

GEOLOGICKÉ UKLÁDÁNÍ CO_2

Klíčové otázky a odpovědi

Rychlý přehled

- Globální snižování množství CO_2 vypouštěného do atmosféry je dnes nanejvýš naléhavé téma.
- Jednou ze zvažovaných možností je zachytávání CO_2 vypouštěného ve formě průmyslových emisí a jeho ukládání pod zemský povrch.
- Několik desítek zařízení pro podzemní ukládání CO_2 na světě funguje již dnes.
- Všechny aktuálně známé procesy pro zachytávání, přepravu a ukládání CO_2 by ve velkém měřítku bylo možné využívat po roce 2020.
- Pravidla průzkumu lokalit vhodných pro výzkumné a průmyslové účely i jejich následné využívání jsou nastavena závaznými právními předpisy.

Proč je CO_2 problémem?

Množství oxidu uhličitého (CO_2) vypouštěného do ovzduší se ve srovnání s 19. stoletím výrazně zvýšilo. Hlavním důvodem je neustále rostoucí spotřeba fosilních paliv (ropy, zemního plynu a uhlí) v průmyslu, dopravě i domácnostech. Fosilní paliva obsahují uhlík – při jejich spalování se pak utváří CO_2 a v kouři vycházejícím z továrních komínů, kotlů a výfuků motorových vozidel se dostává do atmosféry.

CO_2 je dnes hlavním skleníkovým plynem vznikajícím v důsledku lidské činnosti a všeobecně je považován za jednoho z hlavních viníků probíhajících klimatických změn.

CO_2 je však také nutný pro život...

Oxid uhličitý je zachycován rostlinami a lesy. Ty z něj pomocí fotosyntézy vytvářejí kyslík, jež ostatní živé bytosti potřebují k dýchání. Zároveň oxid uhličitý na naší planetě udržuje teplo vytvářené slunečními paprsky. Bez tohoto jevu, známého jako „skleníkový efekt“, by život na Zemi nebyl možný. Je-li však v atmosféře CO_2 nadbytek, začne skleníkový efekt působit až příliš silně.

Nebudou-li rychle přijata opatření k radikálnímu omezení emisí CO_2 , vzroste podle analýz IPCC, mezinárodního panelu odborníků na změny klimatu, do roku 2100 průměrná teplota na zemském povrchu o 2,4 °C až 6,4 °C. Již nárůst o 2 °C se přitom považuje za změnu, která by pro lidstvo a životní prostředí mohla mít kritické důsledky. Abychom překročení této hranice zabránili, je třeba nejpozději do roku 2050 snížit celosvětové emise CO_2 alespoň o 50%.

Množství CO_2 vypouštěného vlivem lidské činnosti do atmosféry dnes činí 30 miliard tun ročně; pouze polovinu tohoto množství přitom přirozeně pohltnou oceány, půda a lesy. Dvě třetiny všech emisí CO_2 pochází z průmyslových zařízení: uhelných a plynových elektráren, hutí, cementáren, rafinerií apod.

Jediná uhelná elektrárna dodávající energii městu se 750 000 obyvateli například vyprodukuje 4,5 miliónu tun CO_2 .

A co Česká republika?

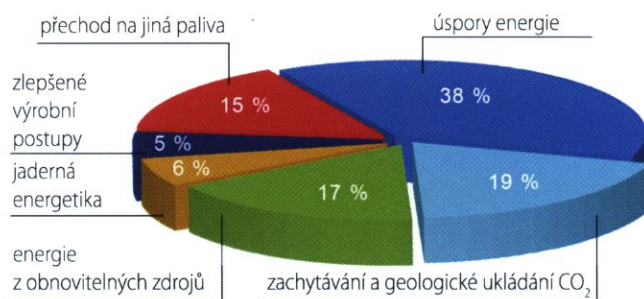
Lidskou činností se u nás ročně uvolní do ovzduší asi 127 milionů tun CO_2 . Zhruba 40% tohoto objemu pochází z energetiky, po níž následují průmysl, doprava a domácnosti.



Co s tím můžeme dělat?

Potřebného masivního snížení emisí CO₂ nelze dosáhnout jen pomocí jediného řešení. Podle Mezinárodní energetické agentury by 38% potřebného snížení emisí do roku 2050 mohlo být dosaženo díky úsporám energie a 17% využíváním obnovitelných zdrojů energie.

Dalším řešením je zachytávání CO₂ vypouštěného velkými průmyslovými provozy a jeho následné trvalé ukládání do hornin hluboko pod zemským povrchem, kde bude izolován od atmosféry. Podle současných znalostí by geologické ukládání CO₂ mohlo zajistit až 19% potřebného snížení emisí do roku 2050.

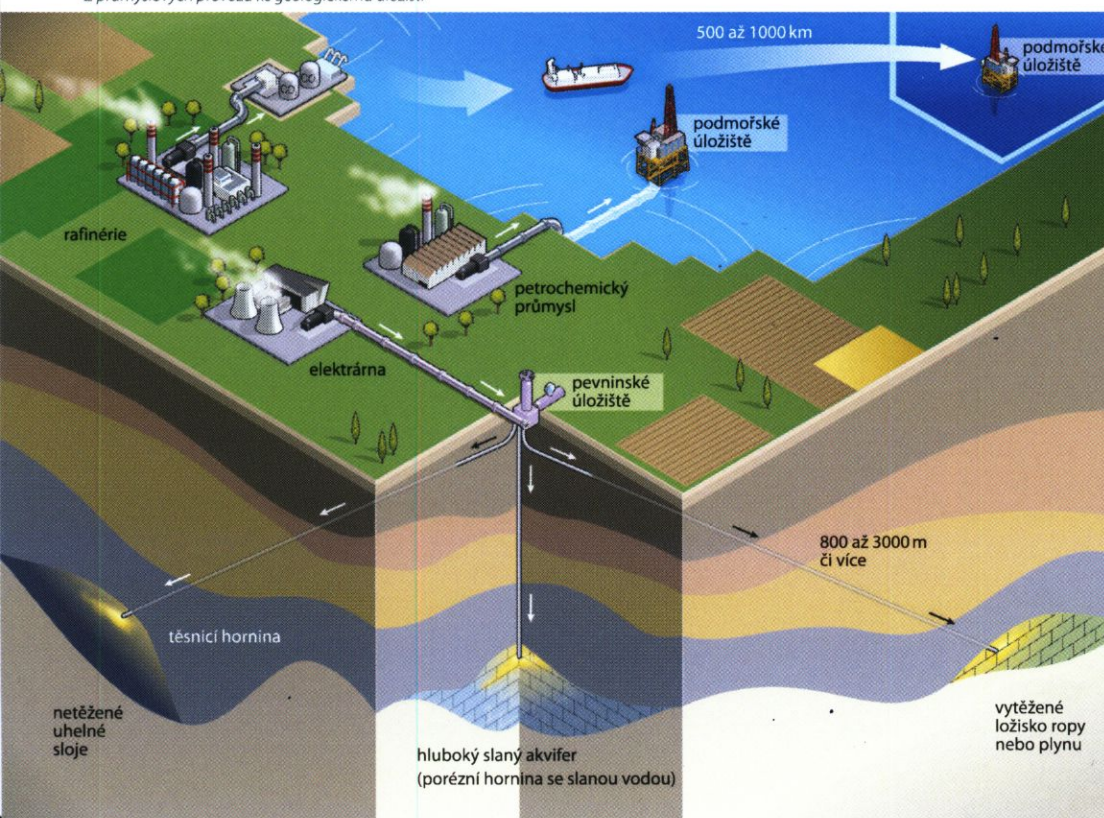


Řešení pro snížení globálních emisí CO₂ do roku 2050, Mezinárodní energetická agentura 2010.

Jak přesně zachytávání a geologické ukládání CO₂ probíhá?

Díky několika inovativním technologiím je dnes možné CO₂ oddělovat od jiných plynů z průmyslových spalín a stlačit jej, aby zabíral méně místa. Potrubím nebo lodí se pak přepraví na místo podmořského či pevninského úložiště a pomocí speciálních vrtů vtlačí hluboko pod zemský povrch. Tuto metodu lze přitom nejlépe využít u průmyslových zařízení vypouštějících více než 100 000 tun CO₂ za rok.

Z průmyslových provozů ke geologickému úložišti



© GDF SUEZ - Agence IDE

A co Česká republika?

ČR je smluvní stranou Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu a Kjótského protokolu. V roce 2014 ČR ratifikovala změnu Kjótského protokolu, která na období 2013–2020 stanovuje pro EU závazek snížit agregované emise skleníkových plynů o 20% oproti výchozímu roku 1990. V rámci tzv. klimaticko-energetického balíčku EU se ČR zavázala k tomu, že do roku 2020 sníží emise CO₂ ze stacionárních zdrojů o 21% ve srovnání s rokem 2005.

Lze ukládat též CO₂ z dopravy nebo domácností?

To možné není. V těchto případech je CO₂ příliš rozptýlený a nelze jej zachytit. Tyto emise přitom celosvětově tvoří zhruba třetinu celkového množství CO₂ vypouštěného do ovzduší.



A co Česká republika?

Pro ČR je zachytávání a geologické ukládání CO₂ (CCS) důležité z dlouhodobého hlediska. Pro mnoho průmyslových oborů (např. ocelárny, cementárny, chemické provozy) je při snižování emisí CO₂ nezastupitelné. Může také sehrát důležitou úlohu při využití fosilních paliv v energetice bez velkého množství emisí CO₂.

Kde může být CO₂ ukládán?

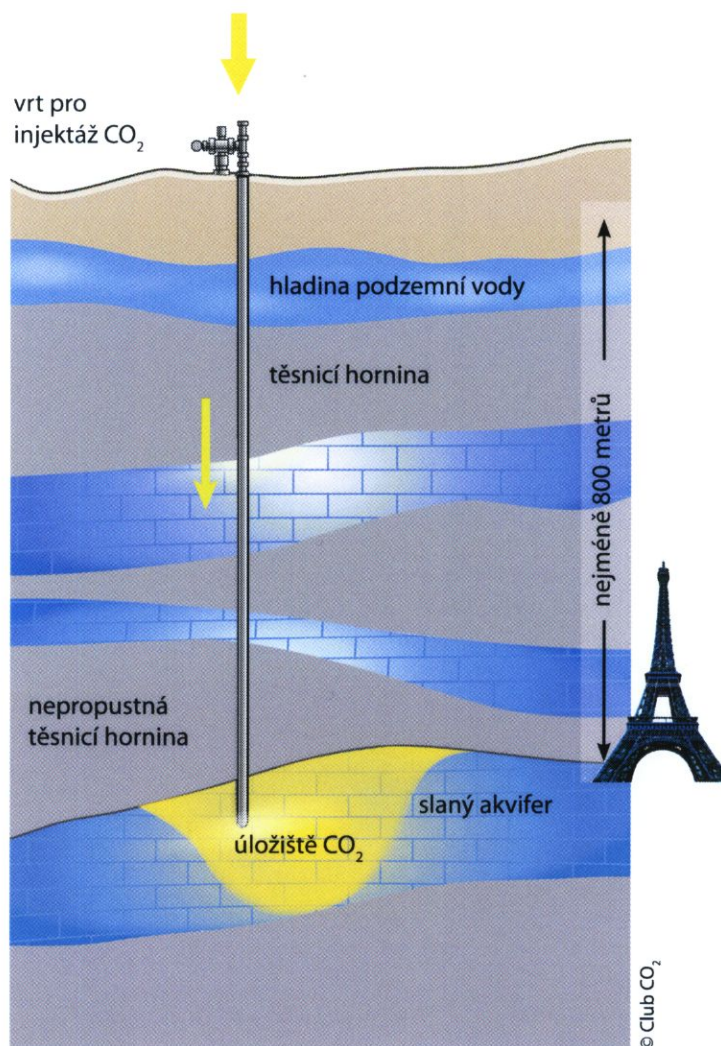
CO₂ musí být ukládán do hloubek více než 800 metrů, aby se zvýšila jeho hustota a snížil objem. Lokality vhodné k ukládání CO₂ zahrnují například:

- Hluboké slané akvifery: jedná se o porézní vrstvy hornin obsahující slanou vodu (tzv. solanku) nevhodnou ke spotřebě. Tyto struktury mají potenciálně největší kapacitu pro ukládání CO₂.
- Vytěžená ložiska uhlovodíků (ropy a zemního plynu).
- Uhelné sloje nacházející se příliš hluboko na to, aby mohly být těženy.
- Specifické druhy hornin, například čedič.

Na světě se nachází obrovské množství potenciálních úložišť CO₂; jejich celková úložná kapacita se odhaduje až na 10 bilionů tun.

A co Česká republika?

Na území ČR se struktury vhodné pro geologické ukládání CO₂ také vyskytují. Úložná kapacita hlubokých akviferů byla předběžně odhadnuta na 760–2860 milionů tun. Poměrně malé množství CO₂ je potenciálně možné uložit také do vytěžených ložisek ropy a plynu. V současnosti probíhají přípravné práce pro realizaci případného pilotního projektu ukládání CO₂ do vytěženého ložiska ropy.



Průřez podzemním úložištěm CO₂ v slaném akviferu, zobrazující jednotlivé nepropustné vrstvy, jež se střídají s vrstvami porézními a propustnými.

Co se děje postupem času?

Vezměme si příklad ukládání ve slaném akviferu. Injektovaný CO₂ je lehčí než voda a vystoupá až na hranici s nepropustnou těsnicí horninou, která mu v dalším vzestupu brání. Určitá část plynu se zachytí v nejmenších (mikroskopických) pórech propustné horniny. Další část plynu se rozpustí v solance a má tendenci klesat ke dnu rezervoáru.

Rozpuštěný CO₂ pomalu reaguje s horninovým prostředím rezervoáru a v průběhu několika tisíc let postupně utvoří nové minerální látky. Na různých místech probíhá každý z těchto procesů s různou intenzitou, která závisí na konkrétních geologických podmínkách v dané lokalitě.

Ukládat CO₂ – to zní jako trochu zvláštní nápad...

Ve skutečnosti ne! V některých pánvích sedimentárního původu, například v lokalitě Montmiral na jihovýchodě Francie, jsou přírodní ložiska CO₂ již miliony let. Některá z těchto ložisek přitom obsahují více než miliardu tun CO₂.



Jak zjistíme, zda je CO₂ pod zemí bezpečně zachycen?

Díky pozorování a měření v lokalitách, kam byl uložen. Pět velkých provozovaných průmyslových úložišť ve světě má takovéto monitorovací nástroje. Mezi ně patří například norský Sleipner (v provozu od roku 1996) nebo alžírský In Salah (od roku 2000) – obě tato úložiště pojmu zhruba milion tun CO₂ ročně. Monitorována budou i všechna budoucí úložiště.

A co bezpečnost?

Při zachytávání CO₂ a jeho ukládání pod zem se využívají nové technologie, které v průběhu celého procesu musí splňovat bezpečnostní kritéria – a to jak na zemském povrchu, tak pod ním, v krátkodobém i dlouhodobém horizontu. Bezpečnostní systémy pro zachytávání a přepravu CO₂ jsou již dobře prověřeny; jsou zakotveny v průmyslových normách a legislativě pro průmyslová zařízení. Geologické ukládání CO₂ je konceptem novějším a řídí se evropskou směrnicí z roku 2009, která byla převedena do našich právních předpisů.

Tato směrnice vyžaduje, aby uložení CO₂ bylo trvalé, ekologicky bezpečné a zamezovalo výstupu CO₂ směrem k povrchu, to vše navíc bez narušení horninového prostředí. U každé potenciální lokality pro umístění úložiště se posuzuje, zda splňuje všechny tyto podmínky bezpečnosti, zejména pak požadavky geologické stability (nízké seizmické riziko) a nepropustnosti těsnících hornin.

Jak během injektáže CO₂, tak po uzavření úložiště se dodržují přísná opatření pro prevenci rizik. Před začátkem injektáže a několik desítek let po uzavření úložiště probíhá monitorování lokality pomocí řady různých nástrojů. Cílem tohoto pozorování je sledovat změny odehrávající se v úložišti a ověřit, že nedochází k žádným únikům. Je-li v jakémkoliv z nadložních vrstev zjištěna přítomnost unikajícího CO₂, přijmou se příslušná nápravná opatření – dříve, nežli plyn vystoupá až na povrch.



Co by se mohlo stát, pokud by nějaký CO₂ unikl do atmosféry?

CO₂ je nevýbušný a nehořlavý. Při nízkých koncentracích je neškodný, při koncentracích vyšších než 5% (v uzavřených prostorách, podzemních dutinách apod.) však jeho nebezpečnost roste a hrozí ztráta vědomí či udušení.



Víme o všech možných vlivech na zdraví a životní prostředí?

Částečně. Posuzování těchto vlivů u různých typů úložišť však probíhá v rámci mnoha výzkumných projektů – a to jak laboratorně, tak přímo v terénu.

Jak je veřejnost informována o projektech geologického ukládání CO₂?

Geologické ukládání CO₂ je v ČR usměrňováno zákonem č. 85/2012 Sb. Při povolování průzkumné etapy se bude postupovat podobně jako při stanovení průzkumného území podle geologického zákona, což v praxi znamená např. provedení „veřejného slyšení“. V ČR však dosud žádný takový projekt nemáme. V zahraničí je běžné, že veřejnost je s připravovanými projekty CCS seznamována už ve fázi přípravy takového záměru. Obvyklou formou jsou informační kampaně, veřejné konzultace apod.

Jak mohu zjistit více?

Množství zajímavých informací o technologiích zachytávání a geologického ukládání CO₂ lze najít na informačním portálu pro technologie CCS „CO2NET EAST“

(<http://www.geology.cz/co2net-east>), který provozuje Česká geologická služba.



ČESKÁ
GEOLOGICKÁ
SLUŽBA



© Atoll - ADEME - Production Technoscope

Obsah letáku byl z velké části převzat z tiskového materiálu francouzského sdružení Club CO₂ (www.captage-stockage-valorisation-co2.fr/en/home).

© Atoll - ADEME - Technoscope Production

<http://www.captage-stockage-valorisation-co2.fr/en/download-club-co2-brochure-geological-storage-answers-yours-questions>

Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?

Zodpovědné využívání
fosilních paliv

Odstranění hlavního zdroje
skleníkových plynů

Vrácení uhlíku
zpět do podzemí

Poskytnutí času potřebného
pro rozvoj energetických zdrojů
neohrožujících klima

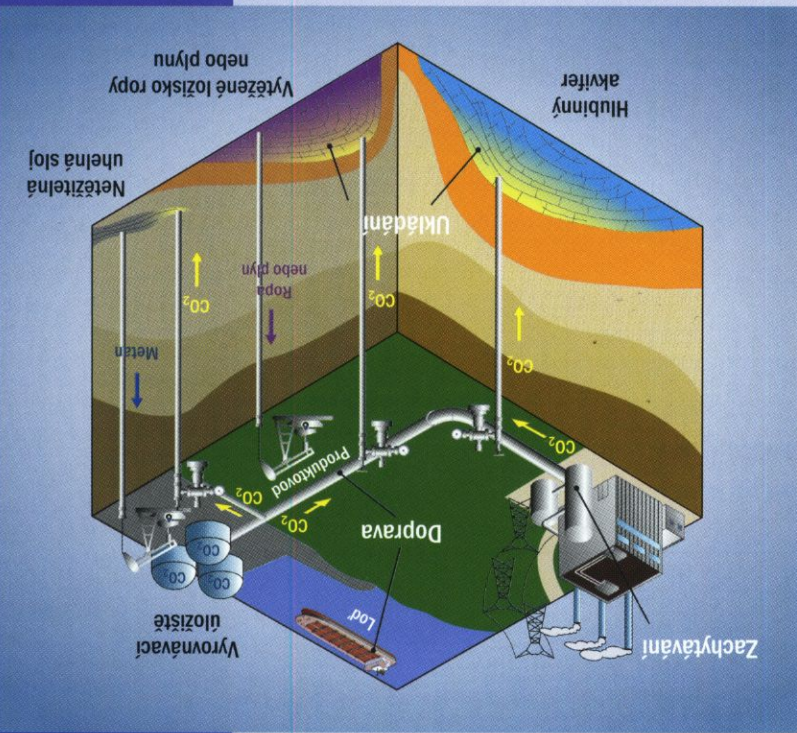


CO₂GeoNet Evropská síť excellence

může zachytávání a ukládání CO₂ (CCS*) se stát rozho-
dující rolí; může totiž přispět až 33 % k omezení emisí
CO₂, jehož je nutno dosáhnout do roku 2050. CCS
zahrnuje zachytávání CO₂ v tepelných elektrárnách,
které spalují uhlí nebo zemní plyn, a v průmyslových
závodech, jako jsou ocelárny, cementárny nebo rafíne-
rie; dále dopravu zachyceného CO₂ potrubím nebo lodí
na místo uložení a poté jeho injektování pomocí vrtu*
do vhodné geologické formace za účelem dlouhodo-
běho uložení (obr. 3). S ohledem na rostoucí světovou
populaci a stoupající potávku po energii v rozvojových
zemích, jakož i na současný nedostatek „čistých“ alter-
nativních zdrojů energie s velkým výkonem je pokračo-
vání využívání fosilních paliv v krátkodobém horizontu
nevyhnutelné. S využitím CCS však lidstvo může ještě
nějaký čas tímto způsobem pokračovat, aniž by došlo
k fatálnímu ohrožení životního prostředí na planetě. CCS
umožní překlenout toto období transformace do doby,
než bude světová ekonomika schopna fungovat na bázi
udržitelné výroby energie.

CCS se úspěšně rozvíjí po celém světě

© BRMG Im@gé



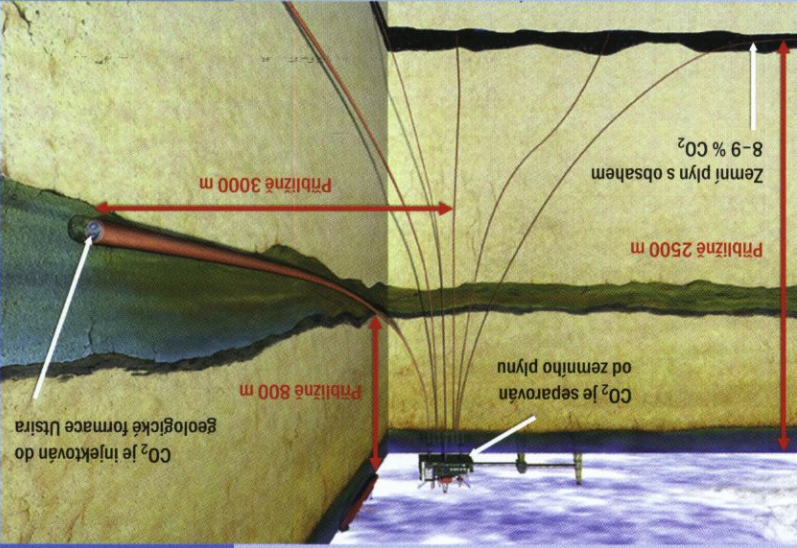
Obrazek 3
V elektrárnách se CO₂
zachytává pomocí
separace od ostatních
plynu. Poté je stlačen
a dopraven potrubím
nebo lodí na místo
geologického uložení:
v hlubinném sláném
akviferu, vytěženém
ložisku ropy nebo plynu,
popř. v netěžitelných
uhelných sloužích.

kteřá má udržet Evropu v cele rozsáhlého mezinárod-
ního výzkumu. Jedním z cílů CO₂GeoNet je sdělování
jasných, vědecky podložených informací o technické
stránce geologického ukládání CO₂. Pro povzbuzení dia-
logu o základních aspektech této životně důležité tech-
nologie připravili vědci z CO₂GeoNet základní odpovědi
na několik často kladených otázek. Na následujících
stránkách najdete vysvětlení na téma, jak se geolo-
gické ukládání CO₂ dá provádět, za jakých podmínek je
možné a jaká jsou kritéria pro jeho bezpečné a účinné
provazování.

Obrazek 4

Vertikální řez uložštěm Sleipner, Norsko. Zemní plyn je
těžen z hloubky 2500 m: obsahuje několik procent CO₂
který se musí odstranit, aby plyn vyhovoval komerčním
standardům. Namísto vypouštění do atmosféry
se zachycený CO₂ injektuje do pískovcového akviferu*
Utsira v hloubce přibližně 1000 m.

CO₂ je injektován do
geologické formace Utsira
Přibližně 800 m
od zemního plynu
Přibližně 2500 m
Zemní plyn s obsahem
8-9 % CO₂
Přibližně 3000 m



Klíčové otázky ke geologickému ukládání CO₂

Síť excelence CO₂GeoNet byla vytvořena pod patronací
Evropské komise jako skupina výzkumných institucí,

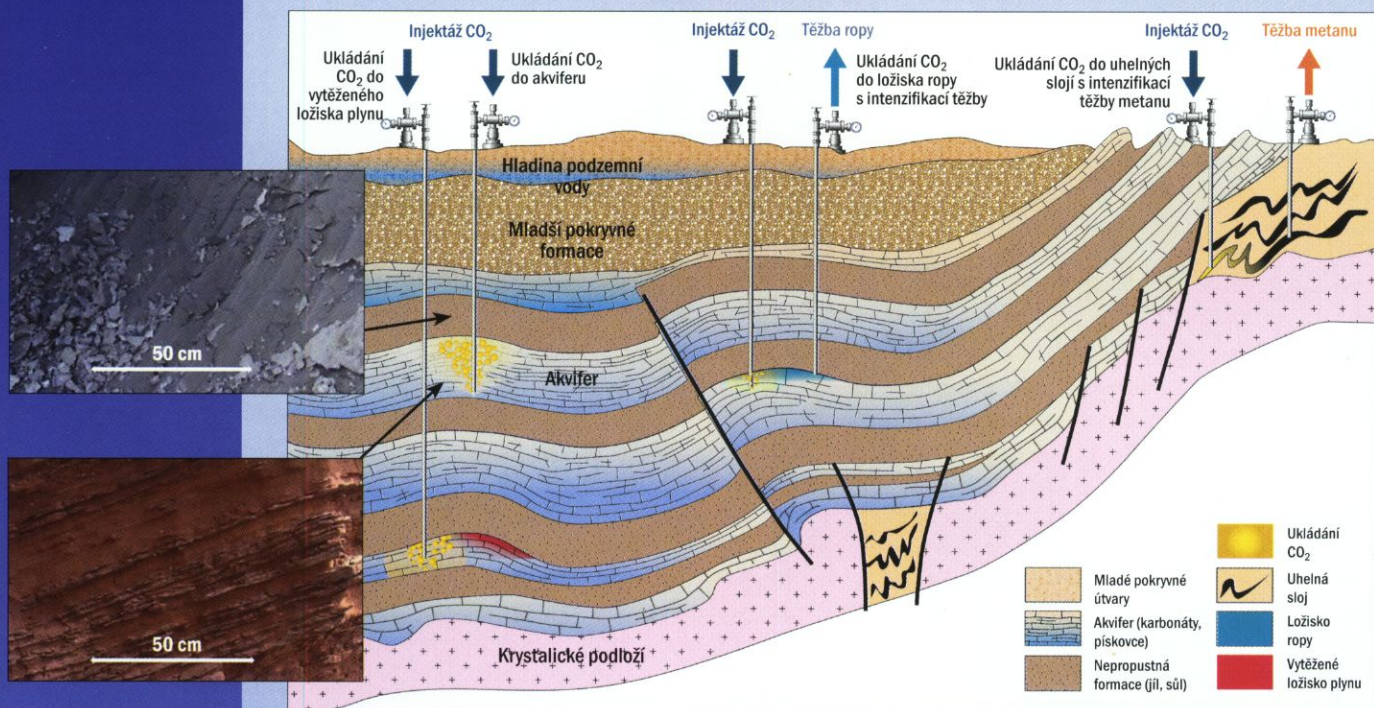
fení na podporu rozvoje a bezpečného využívání CCS.
umožnit rozsáhlé komerční nasazení technologie v roce
2020. V této souvislosti vydala Evropská komise v lednu
2008 „Balíček opatření týkajících se změny klimatu
a energie z obnovitelných zdrojů“, který mimo jiné zahr-
nuje i Směrnici o geologickém ukládání CO₂ a další opat-
ření na podporu rozvoje a bezpečného využívání CCS.

© StatoilHydro

Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?

Kolik CO₂ můžeme v podzemí uložit a kam?

CO₂ nemůže být injektován kamkoli do podzemí, vhodné formace hostitelských hornin je nejprve zapotřebí identifikovat. Potenciální rezervoáry* pro geologické ukládání CO₂ existují po celém světě a skýtají dostatečnou kapacitu pro to, aby metoda CCS mohla významně přispět ke zmírnění změny klimatu vyvolané lidstvem.



Obrázek 1
CO₂ je ukládán do hlubokých geologických vrstev porézních a propustných hornin (viz pískovec v dolním rámečku) a propustných hornin (viz jílovec v horním rámečku) bránícími CO₂ v úniku k povrchu. Hlavní typy potenciálních úložišť jsou:

1. vytěžená ložiska ropy nebo plynu, v některých případech s možností druhotné intenzifikace těžby;
2. akvifery obsahující vodu nevhodnou pro využití obyvatelstvem;
3. hluboké netěžitelné uhelné sloje, někde s možností intenzifikace těžby metanu.

Existují tři hlavní možnosti ukládání CO₂ (obr. 1):

1. Vytěžená ložiska ropy a zemního plynu – díky průzkumu a těžbě uhlovodíků jsou dostatečně prozkoumána, poskytují okamžitou možnost ukládání CO₂.
2. Slané akvifery – skýtají velký úložný potenciál, ale obecně s nižší úrovní poznání.
3. Netěžitelné uhelné sloje – možnost pro budoucnost, jakmile se podaří vyřešit problém s injektáží velkých objemů CO₂ do uhelných slojí s nízkou permeabilitou*.

Rezervoáry

Poté, co je CO₂ injektován do vhodného podzemního rezervoáru, akumuluje se v pórech mezi horninovými zrny a v trhlinách, přičemž odtud vytlačuje a nahrazuje přítomná fluida – vodu, ropu nebo zemní plyn. Vhodné hostitelské horniny pro CO₂ by proto měly mít vysokou pórozitu* a permeabilitu. Takovéto horninové formace jsou výsledkem ukládání sedimentů v geologické minulosti a běžně se nacházejí v tzv. „sedimentárních pánvích“. V některých místech se tyto propustné formace střídají s nepropustnými horninami, které mohou půso-

bit jako nepropustné těsnění. V sedimentárních pánvích se často vyskytují ložiska ropy a zemního plynu, ale i ložiska přírodního CO₂, která pomocí přírodních mechanismů zadržovala ropu, plyn nebo dokonce čistý CO₂ po miliony let. To dokládá schopnost takovýchto struktur zadržovat fluida po dlouhá časová období.

Na obrázcích ilustrujících potenciální možnosti ukládání CO₂ je podpovrchová stavba často znázorňována příliš zjednodušeně, v podobě homogenních, koláčově vrstevnatých struktur. Ve skutečnosti však podloží sestává z nerovnoměrně rozložených horninových formací, rezervoárů a těsnících hornin*, postižených místními zlomy, které dohromady tvoří komplexní, heterogenní struktury. K tomu, aby se dala zodpovědně posoudit vhodnost geologické struktury navrhované pro případně dlouhodobé úložiště CO₂, je třeba podrobných znalostí o dané lokalitě a geologických zkušeností.

Potenciální úložiště CO₂ musí splňovat řadu kritérií, z nichž nejdůležitějšími jsou:

- dostatečná pórozita, permeabilita a úložná kapacita;
- přítomnost nadložní nepropustné horniny – tzv. "těsnící horniny" (např. jíly, jílovec, slínovec, sůl), která zabrání CO₂ v migraci směrem k povrchu;

- existence tzv. "strukturálních pastí" – jeví, jako je např. klenbovitá stavba těsnící horniny, které mohou řídit a usměrňovat rozsah migrace CO₂ v uložné formaci; uložení v hloubce přes 800 m, kde je dostatečně vysoký tlak a teplota pro zajištění ukládání CO₂ ve stlačeném tekutém skupenství, čímž se zajišťí maximallizace jeho uložného množství;
- nepřítomnost pitné vody; CO₂ se nebude injektovat do vod určených pro spotřebu a jiné využití obyvatelstvem.

Kde v Evropě hledat úložiště

Sedimentární pánve jsou v Evropě velmi rozšířené, např. pod mořským dnem v Severním moři nebo na pevnině

horniny vhodné pro geologické ukládání.

Příkladem oblasti se značným potenciálem pro ukládání je tzv. „jílní permská pánev“, která se rozprostírá od Anglie až po Polsko (největší elipsa na obr. 2). Sedimenty byly postíženy horotvornými procesy, které zanechaly část porů vyplněných slanou vodou, ropou nebo zemním plynem. Jilové vrstvy, které leží mezi porézními pískovci, byly stlačeny na polohy s nízkou propustností, které zabráňují výstupu fluid. Velká část pískovcových formací leží v hloubce 1 až 4 km, kde je dostatečný tlak, který umožní uložení CO₂ v tekutém skupenství s vysokou hustotou. Obsah soli ve formálních vodách roste v tomto hloubkovém intervalu ze zhruba 100 g/l na 400 g/l; voda je tedy mnohem slanější než mořská (35 g/l). Horotvorné pohyby, které vytvořily stovky domových struktur postupně zadržujících zemní plyn. Právě tyto „pasti“ jsou předmětem studia jako případná úložiště CO₂ pro pilotní projekty.

Úložná kapacita

Znalost uložné kapacity pro CO₂ je důležitá pro politiku, regulační orgány a provozovatele úložišť. Odhady uložných kapacit jsou obvykle pouze přibližné a založené na prostorovém rozsahu potenciálně vhodných formací. Kapacitu lze posuzovat v různých měřítkách, od celostátního pro hrubé odhady přes pánevní až po úroveň vlastního rezerváru pro přesnější výpočty, které berou v úvahu heterogenitu a komplexnost skutečné geologické struktury.

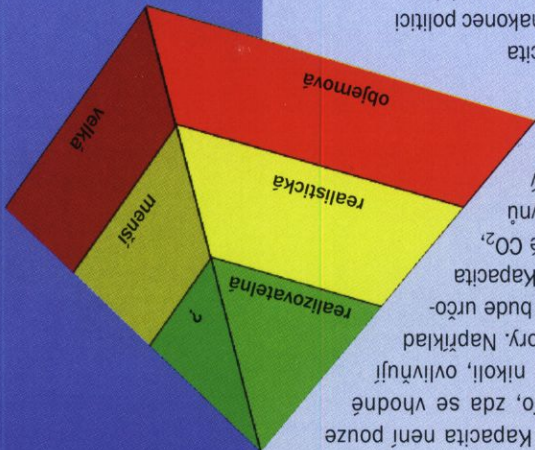
Objemová kapacita: Publikované národní uložné kapacity jsou obecně založeny na výpočtech porového objemu dané formace. Teoreticky lze uložnou kapacitu dané formace vypočítat vynásobením její rozlohy její mocností, průměrnou porozitou a průměrnou hustotou CO₂ za rezervárových podmínek. Protože je však porový prostor už zaplněn vodou, pro

uložení CO₂ lze využít pouze jeho malou část, která se obecně pohybuje v rozmezí 1–3%. Tento koeficient uložné kapacity se pak použije při posuzování objemové kapacity.

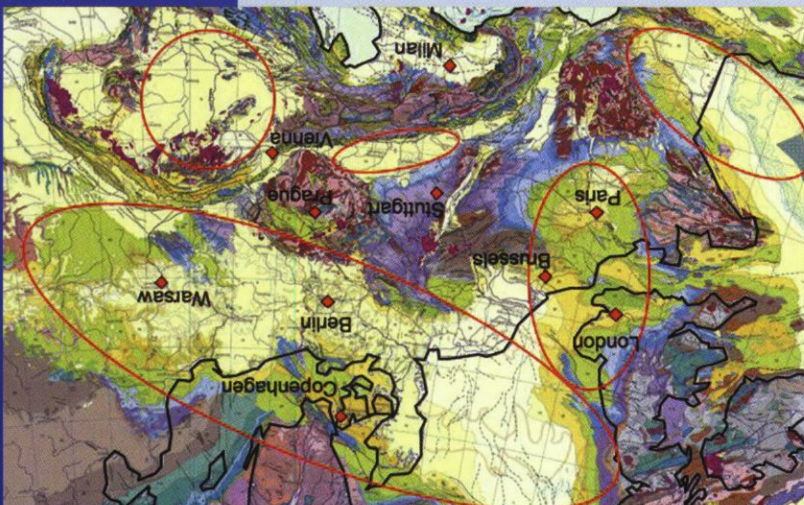
Realistická kapacita: Realističtější odhady kapacity se pro jednotlivá úložiště provádějí pomocí detailního průzkumu. Mocnost formace není konstantní a vlastnosti rezerváru se mohou měnit i na krátkou vzdálenost. Znalost o velikosti, tvaru a geologických vlastnostech struktury nám umožňují snížit míru nejistoty při výpočtu objemu. Na základě těchto informací může být využito počítačových simulací k předpovědi průběhu injektáže CO₂ a jeho pohybu v rezerváru a tím i k odhadu realistické uložné kapacity.

Realizovatelná kapacita: Kapacita není pouze záležitostí fyziky hornin. To, zda se vhodné úložiště opravdu využije či nikoli, ovlivňují také socioekonomické faktory. Například doprava od zdroje k úložišti bude určována transportními náklady. Kapacita bude také záviset na čistotě CO₂, protože přítomnost jiných plynů omezí objem úložiště, který bude k dispozici pro CO₂. Poslední slovo při rozhodování o tom, zda bude dostupná uložná kapacita opravdu využita, budou mít nakonec politici a veřejnost, jejíž souhlas je rozhodující.

Závěrem můžeme konstatovat, že máme vědomosti o tom, že kapacita pro ukládání CO₂ v Evropě je značná, a to i při uvážení nejistot ohledně komplexnosti a heterogenity rezerváru i socioekonomických faktorů. Projekt EU GESTCO* dospěl k odhadu uložné kapacity pro CO₂ v ložiskách ropy a plynu v Severním moři a přilehlých oblastech na úrovni 37 Gt, což by umožnilo pro-voz velkých zařízení na ukládání CO₂ v této oblasti pro uložných kapacit v Evropě je předmětem probíhajícího výzkumu v jednotlivých členských zemích EU; na celoevropské úrovni se této problematice věnoval nedávno dokončený projekt EU GeoCapacity*.



Obrazek 2
Geologická mapa Evropy ukazující rozmístění hlavních sedimentárních pánví (červené elipsy), kde lze najít vhodné rezerváry pro ukládání CO₂ (podklad – Geologická mapa Evropy v měřítku 1 : 5 000 000).



Jak můžeme přepravovat a ukládat velká množství CO₂?

Po zachycení v průmyslovém zařízení je CO₂ stlačen, přepraven a pak injektován do úložné formace pomocí jednoho nebo více vrtů. Celý řetězec musí být optimalizován, aby umožnil uložení několika milionů tun CO₂ ročně.

Stlačení

CO₂ je stlačen do podoby husté tekutiny, která zabírá výrazně méně objemu než CO₂ v plynném skupenství. Jakmile je CO₂ v elektrárně nebo jiném průmyslovém zařízení separován ze spalin, výsledný vysoce koncentrovaný tok CO₂ je dehydrován a stlačen, což zlepšuje efektivitu dopravy a ukládání (**obr. 1**). Dehydratace (odstranění vody) je potřeba, aby se předešlo korozi zařízení a infrastruktury a také, za vysokých tlaků, vytváření hydrátů (pevných krystalů podobných ledu, které mohou zařízení a potrubí ucpat). Stlačení se provádí společně s dehydratací v několikastupňovém procesu: opakovanými cykly stlačení, ochlazení a odstranění vody. Tlak, teplotu a obsah vody je třeba přizpůsobit způsobu dopravy a tlakovým požadavkům v místě ukládání. Klíčovými parametry pro projekt instalace kompresorů jsou rychlost proudění plynu, sací a výtlačný tlak, tepelná kapacita plynu a účinnost kompresoru. Technologie stlačování je dostupná a široce využívána v mnoha průmyslových odvětvích.

Doprava

CO₂ může být dopravován lodí nebo produktovodem. Doprava lodí je dnes využívána pouze ve velmi malých měřítkách (10 000–15 000 m³) pro průmyslové účely,

ale může se stát atraktivní možností v budoucích projektech CCS, jestliže budou zdroje CO₂ blízko pobřeží a daleko od vhodných úložišť. Pro přepravu CO₂ jsou vhodné lodě, jež jsou dnes využívány pro dopravu zkapalněného plynu (LPG nebo LNG). Zvláště to platí pro jejich chladicí systémy, zajišťující zároveň ochlazování i stlačování; CO₂ je tak možno dopravovat v kapalném stavu. Nejnovější lodě pro LPG mají objem až 200 000 m³ a jsou schopny přepravit 230 000 t CO₂. Lodní doprava však nezajistí nepřetržitý logistický tok, a v přístavech proto bude třeba vybudovat zařízení pro přechodné skladování a překládku CO₂.

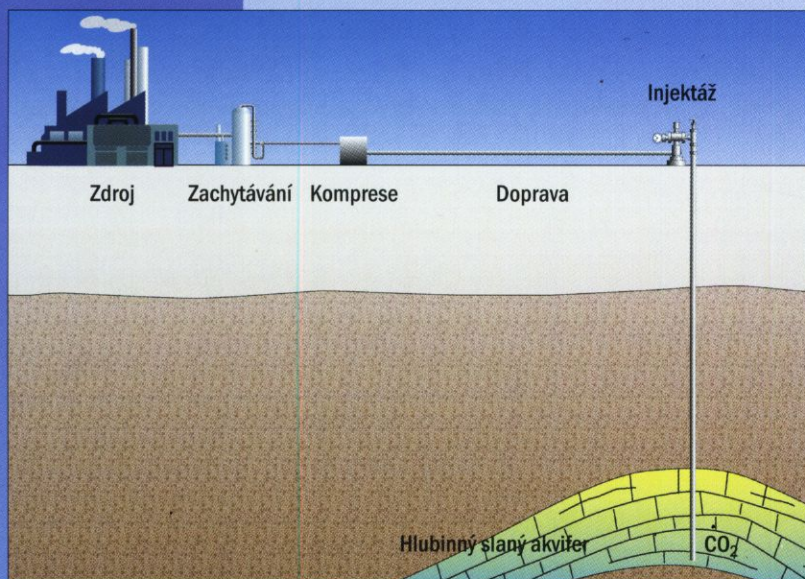
Potrubím dnes dopravují CO₂ ve velkém množství ropné společnosti a využívají ho při intenzifikaci těžby ropy (EOR*). Ve světě je v provozu přes 3000 km produktovodů pro dopravu CO₂, převážně v USA. Tento typ dopravy je cenově efektivnější než doprava lodí, a také poskytuje výhodu nepřetržitého toku od zařízení pro zachytávání až do úložiště. Všechny stávající produktovody jsou provozovány pod vysokým tlakem, v tzv. superkritických* podmínkách, kdy se CO₂ chová jako plyn, ale má hustotu jako kapalina. Množství látky, které je produktovod schopen přepravit, závisí na třech důležitých faktorech: průměru potrubí, tloušťce jeho stěny a tlaku v celé jeho délce.

Injektáž

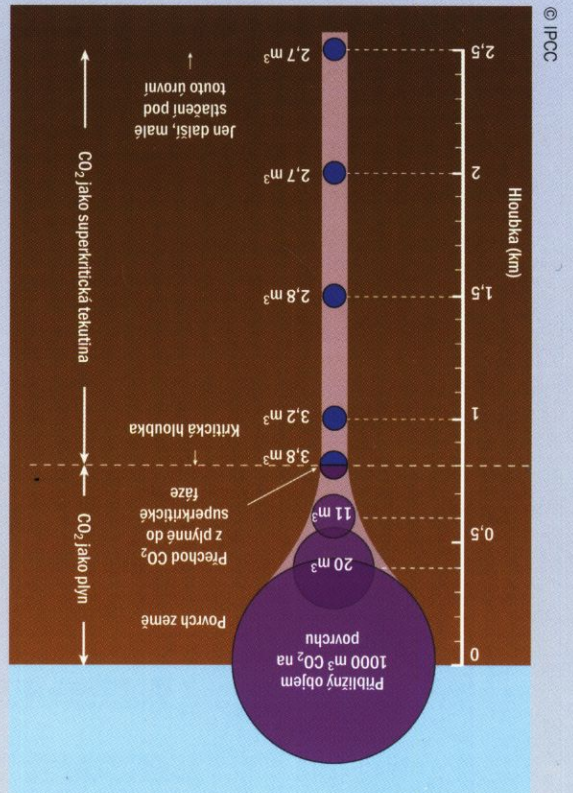
Když je CO₂ dopraven na úložiště, je pod tlakem injektován do rezervoáru (**obr. 2**).

Injektážní tlak musí dostatečně převyšovat stávající tlak v rezervoáru, aby byla rezervoárová fluida zatlačena dále od bodu injektáže. Počet injektážních vrtů závisí na množství ukládaného CO₂, rychlosti injektáže (množství injektovaného CO₂ za hodinu), permeabilitě a moci rezervoáru, maximálním bezpečným injektážním tlaku a na typu vrtu. Protože hlavním cílem je dlouhodobé uložení CO₂, musíme si být jisti hydraulickou integritou formace. Vysoké rychlosti injektáže mohou způsobit nárůst tlaku v bodě injektáže, zvláště ve formacích s nízkou permeabilitou. Injektážní tlak by zpravidla neměl překročit mezní tlak pro tvorbu trhlin v hornině; jinak může dojít k porušení rezervoáru a nadložní těsnicí horniny. Ke stanovení maximálního injektážního tlaku, při kterém nedojde k porušení formace, se používají geo-mechanické analýzy a modely.

Obrázek 1
Fáze geologického ukládání CO₂. Aby se CO₂ dostal z bodu emise do místa svého bezpečného a trvalého uložení, musí projít celým řetězcem operací, který zahrnuje jeho zachycení, stlačení, dopravu a uložení.



© BRMG im@gg



Obrazek 2
 Při injekci do podzemí se v hloubce kolem 0,8 km CO₂ stává hustou, superkritickou tekutinou. Jeho objem dramaticky klesá z 1000 m³ na povrchu na 2,7 m³ ve dvoukilometrové hloubce. To je jeden z faktorů, které činí geologické ukládání velkých množství CO₂ tak atraktivním.

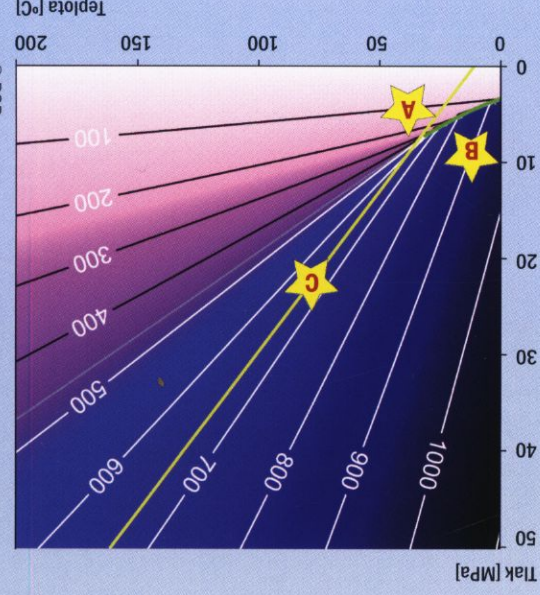
Chemické procesy mohou ovlivnit rychlost, kterou může být CO₂ injektován do uložné formace. V závislosti na typu rezervárových hornin, složení fluid a podmínkách v rezerváru (teplota, tlak, objem, koncentrace atd.) se v blízkosti vrtu mohou vyskytnout procesy rozpouštění a srážení minerálů. To může způsobit zvýšení nebo snížení rychlosti injektáže. Jakmile je CO₂ vtláčen do rezerváru, jeho část se rozpustí ve slané formální vodě a pH* mírně klesne, což je tlumeno rozpouštěním karbonátových minerálů přítomných v hostitelské hornině. Karbonáty jsou prvními minerály, které se rozpouštějí, protože jejich reakční rychlost je velmi vysoká; rozpouštění začíná ihned po zahájení injektáže. Tento proces rozpouštění může zvýšit porozititu horniny a injektivitu*. Karbonátové minerály se však po rozpouštění mohou znovu vysrážet a zacementovat tak uložnou formaci kolem vrtu. Pro omezení snižování permeability v okolí vrtu lze využít vysokých rychlostí injektáže, které posunou oblast geochemické rovnováhy se srážením minerálů do větší vzdálenosti. Vysušování je další jevem způsobeným injektáží. Po fázi oxysezení se zbylá voda v okolí injektážního vrtu rozpouští v injektovaném suchém plynu, čímž dochází ke koncentraci chemických látek původně obsazených v solance*. Má-li solanka dostatečně vysokou koncentraci těchto látek, může dojít k vysrážení minerálů (např. soli) a tím ke snížení permeability v okolí vrtu.

Složení toku CO₂

Výše uvedené problémy s injektivitou závisí na kompenčních procesech vzájemného působení látek v okolí injektážního vrtu, ale jsou také výrazně závislé na čase a na vzdálenosti od vrtu. Pro posouzení těchto efektů se využívají numerické simulace. S rychlostmi injektáže je třeba zacházet opatrně, aby se zvládly procesy, které by mohly omezit uložení požadovaných množství CO₂.

Složení a čistota toku CO₂, které jsou výsledkem procesu zachytávání, mají významný vliv na všechny následné stránky projektu ukládání CO₂. Přítomnost několika procent jiných substancí, jako např. vody, sírovodíku (H₂S), oxidů síry a dusíku (SO_x, NO_x), dusíku (N₂) a kyslíku (O₂), ovlivní fyzikální a chemické vlastnosti CO₂ a nímí spojené chování a jeho důsledky. Přítomnost těchto substancí je proto nutno brát bedlivě v úvahu při plánování stlačování, dopravy a injektáže a také při úpravách provozních podmínek a zařízení.

Na závěr lze konstatovat, že doprava a ukládání velkých množství CO₂ je realizovatelná už v současnosti. Má-li se však geologické ukládání CO₂ široce uplatnit, všechny fáze procesu musí být „ušity na míru“ pro každý projekt ukládání. Klíčovými parametry při tom jsou termodynamické vlastnosti toku CO₂ (obr. 3), rychlosti toku a podmínky v přepravních cestách a v rezerváru.



Obrazek 3
 Hustota čistého CO₂ (v kg/m³) jako funkce teploty a tlaku. Zluta čára odpovídá typickému gradientu tlaku a teploty v sedimentární pánvi. Při hloubce nad 800 m (~ 8 MPa) podmínky v rezerváru podporují vysoké hustoty (modré stínování). Zelená křivka znázorňuje fázové rozhraní mezi plynným CO₂. Typické tlakové a teplotní podmínky pro zachytávání, dopravu a ukládání jsou označeny písmeny A, B a C.

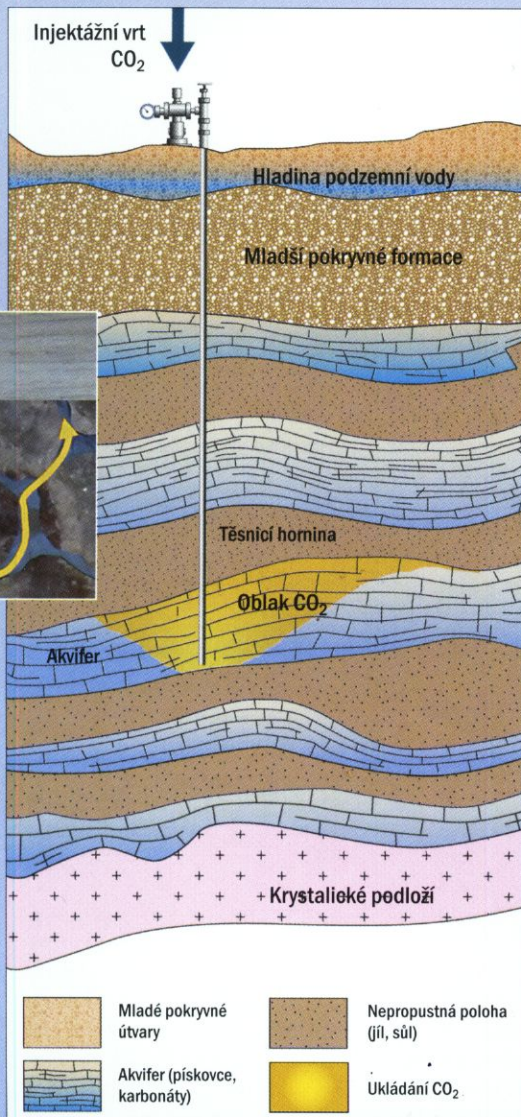
Co se stane s CO₂ po uložení do podzemního rezervoáru?

Jakmile je CO₂ injektován do rezervoáru, začne okamžitě stoupat vzhůru a vyplňovat pórový prostor pod těsnicí horninou. Postupem času se část CO₂ rozpustí a případně se přemění na minerály. Tyto procesy probíhají v různých časových měřítkách a přispívají k trvalému zadržení CO₂.

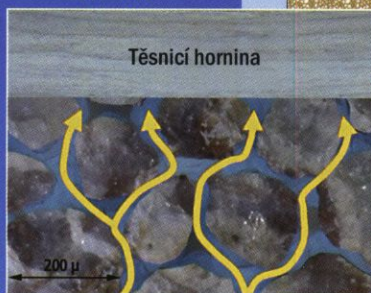
Mechanismy zadržení

Po injektáži do rezervoáru vyplňuje CO₂ pórové prostory v hornině, které jsou ve většině případů už zaplněny solankou, tj. slanou vodou.

Postupně se dostává do hry několik mechanismů. První z nich je považován za nejdůležitější a brání CO₂ v pronikání k povrchu. Další tři směřují k posílení účinnosti a bezpečnosti ukládání v čase.



Mikroskopický pohled.



Obrázek 1
Injektovaný CO₂, který je lehčí než voda, má tendenci stoupat vzhůru a je zastaven až nadložními nepropustnými horninami.

1. Akumulace pod těsnicí horninou (strukturní zadržení)

Protože i „hustý“ CO₂ je lehčí než voda, má tendenci stoupat vzhůru. Tento pohyb se zastaví, když CO₂ narazí na vrstvu hornin, která je nepropustná, tzv. „těsnicí horninu“. Tato hornina, obvykle složená z jílu nebo soli, působí jako past a brání CO₂ stoupat dále vzhůru, což vede k jeho nahromadění bezprostředně pod těsnicí horninou. **Obr. 1** ukazuje pohyb CO₂ směrem vzhůru pórovým prostorem horniny (vyznačen modře), dokud nedosáhne těsnicí horniny.

2. Imobilizace v malých pórech (reziduální zadržení)

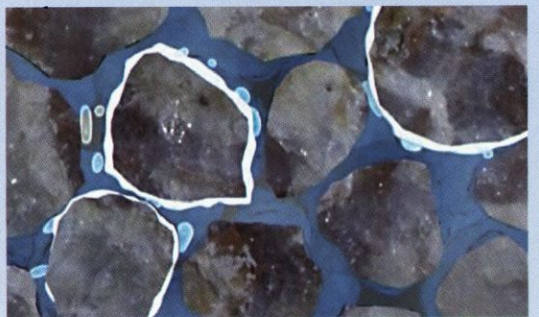
Reziduální zadržení nastává, když jsou póry v rezervoárové hornině tak úzké, že se CO₂ už nemůže dále pohybovat směrem vzhůru, a to i přes rozdíl v hustotě vůči okolní vodě. Tento proces se vyskytuje hlavně během migrace CO₂ a obvykle může imobilizovat několik procent injektovaného CO₂, v závislosti na vlastnostech rezervoárové horniny.

3. Rozpouštění (zadržení pomocí rozpouštění)

Malé množství injektovaného CO₂ se rozpustí – nebo je převedeno do roztoku – v solance přítomné v pórovém prostoru rezervoáru. Důsledkem rozpouštění je skutečnost, že voda s rozpouštěným CO₂ je těžší než voda bez něj. Má tím pádem tendenci pohybovat se směrem dolů ke dnu rezervoáru. Rychlost rozpouštění závisí na kontaktu mezi CO₂ a solankou. Množství CO₂, které se může rozpustit, je omezeno maximální koncentrací. Vzhledem k pohybu injektovaného CO₂ směrem vzhůru a vody s rozpouštěným CO₂ směrem dolů však dochází k neustálému obnovování kontaktu mezi solankou a CO₂. Tím se zvyšuje množství CO₂, které se může rozpustit. Tyto procesy jsou relativně pomalé, protože probíhají v úzkých pórových prostorech. Hrubé odhady v rámci projektu Sleipner naznačují, že se za 10 let ukládání rozpustilo cca 15 % injektovaného CO₂.

4. Mineralizace (minerální zadržení)

CO₂, zvláště v kombinaci se solankou přítomnou v rezervoáru, může reagovat s minerály tvořícími horniny úložiště. Některé minerály se mohou roz-



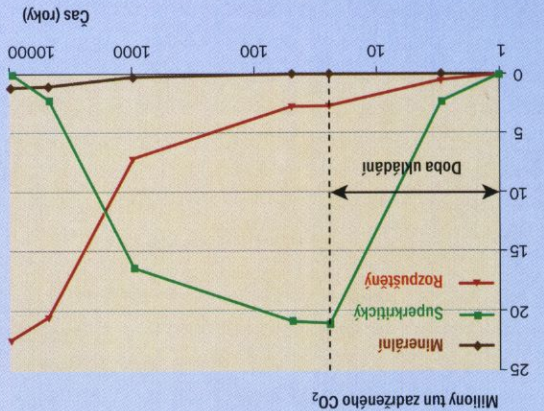
Obrazek 2

CO₂ ve formě husté tekutiny migruje vzhůru (světlemodré bubliny), přičemž rozpouští horninová zrna a reaguje s nimi. To vede k vysrážení karbonátových minerálů na okrajích zrn (bílá barva).

pusť, zatímco jiné se naopak mohou vysrážet, a to v závislosti na pH a minerálním složení rezervoáruých hornin (obr. 2). Odhady na Sleipner naznačují, že i po velmi dlouhé době bude pomocí mineralizace zadržena jen relativně malá část CO₂. Po 10 000 letech by mělo být mineralizací zadrženo pouhých 5 % uloženého CO₂, zatímco 95 % by se mělo rozpustit a žádný CO₂ by neměl zůstat ve formě samostatné fáze (husté tekutiny).

Relativní význam těchto zadržných mechanismů je specifický pro každé uložště, tzn. že závisí na vlastnostech každé jednotlivě uložené struktury. Například v domo-ých (antiklinálních) rezervoárech by měl CO₂ zůstat převážně ve fázi husté tekutiny i po dlouhém časovém období, zatímco v plochých rezervoárech, jako je např. Sleipner, se většina CO₂ rozpustí nebo bude minerali- zována.

Vývoj podílu CO₂ zadržného různými zadržnými mecha- nismy v případě Sleipneru je znázorněn na obr. 3.



Obrazek 3

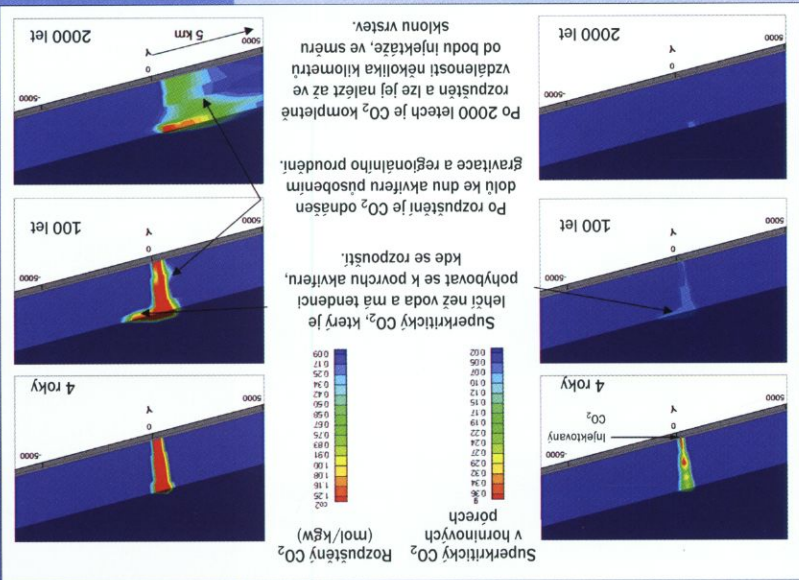
Vývoj přítomnosti CO₂ v různých formách v rezervoáru Sleipner podle numerické simulace. CO₂ je zadrženo v superkritickém stavu pomocí mechanismů 1 a 2, v rozpouštěné formě pomocí mechanismu 3 a v minerální formě pomocí mechanismu 4.

Jak to všechno víme?

Znalost těchto procesů pochází ze čtyř hlavních zdrojů informací:

- **Laboratorní měření:** experimenty malého měřítka zabývající se mineralizací, prouděním a rozpouštěním lze provádět na vzorcích hornin; umožňují proniknout do podstaty krátkodobých procesů malého měřítka. Numerické simulace: byly vyvinuty počítačové programy, které lze využít k predikci chování CO₂ v mnohem delších časových intervalech (obr. 4). Laboratorní pokusy se používají ke kalibraci numerických simulací.
- **Studium přírodních rezervoárů CO₂,** kde je CO₂ (většinou vulkanického původu) zadržováno v podzemí po dlouhá časová období, často po miliony let. Takové struktury jsou označovány jako „přírodní analogy“. Tyto lokality nám poskytují informace o chování plynu a dlouhodobých důsledcích přítomnosti CO₂ v podzemí.
- **Monitorování probíhajících demonstračních projektů geologického ukládání CO₂,** jako jsou např. Sleipner (při pobřeží Norska), Weyburn (v Kanadě), In Salah (v Alžírsku) nebo K12b (při pobřeží Nizozemí). Výsledky krátkodobých simulací zde mohou být porovnány se skutečnými terénními daty, což umožní zprpsnit použité modely.

Obrazek 4
Trojrozměrné modelování migrace CO₂ po injektáži 150 000 tun v průběhu 4 let v akviferu dogberského stáří ve Francii. Je znázorněn superkritický CO₂ (vlevo) a CO₂ rozpouštěný v solance (vpravo), a to 4, 100 a 2000 let od začátku injektáže. Simulace je založena na výsledcích terénních experimentů.



Pouze pomocí neustále kritické kontroly a kritických odkazů mezi těmito čtyřmi zdroji informací je možné získat spolehlivé znalosti o všech procesech odehrávajících se v nejkých 1000 m pod našima nohami.

Na závěr je třeba zdůraznit, že už dnes je známo, že bezpečnost uložště CO₂ se zvyšuje s časem. Nejkritičtějším bodem je nalezení rezervoáru s vhodnou těsnící horninou v nadloži*, která je schopna zadržet CO₂ (strukturní zadrženi). Všechny další procesy spojené s rozpouštěním, mineralizací a reziduálním zadržením působí příznivě ve smyslu zabránění migraci CO₂ k povrchu.

Mohl by CO₂ uniknout z úložiště, a pokud ano, jaké by byly důsledky?

Na základě studia přírodních systémů lze říci, že u pečlivě vybraných úložišť se neočekávají žádné významné úniky. Přírodní rezervoáry obsahující plyn nám pomáhají porozumět podmínkám, při kterých je plyn zadržován nebo naopak uniká. Lokality s přirozenými úniky nám navíc pomáhají pochopit, jaké by mohly být důsledky úniku CO₂.

Únikové cesty

Potenciální únikové cesty jsou obecně buď umělé vytvořené (např. hluboké vrty), nebo přirozené (např. zlomy a puklinové systémy).

Aktivní i opuštěné vrty mohou představovat migrační cesty, protože jednak tvoří přímé propojení mezi povrchem a rezervoárem, jednak jsou tvořeny materiály vyrobenými člověkem, které mohou v dlouhém časovém horizontu korodovat (**obr. 1**). Komplikaci navíc představuje i to, že ne všechny vrty byly vytvořeny za použití stejných technologií, a proto jsou novější vrty obecně bezpečnější než staré. Dá se však očekávat, že riziko úniku podél vrtů bude všeobecně nízké, protože staré i nové vrty mohou být velmi efektivně monitorovány s využitím citlivých geochemických a geofyzikálních metod, a také proto, že v naftovém průmyslu existují technologie pro jakákoli nápravná opatření, která by mohla být zapotřebí.

Otázka úniků podél zlomů nebo puklin, které by mohly existovat v těsnicí vrstvě nebo obecně v nadloží, je složitější, protože se zde jedná o nepravidelné plošné struktury s proměnlivou

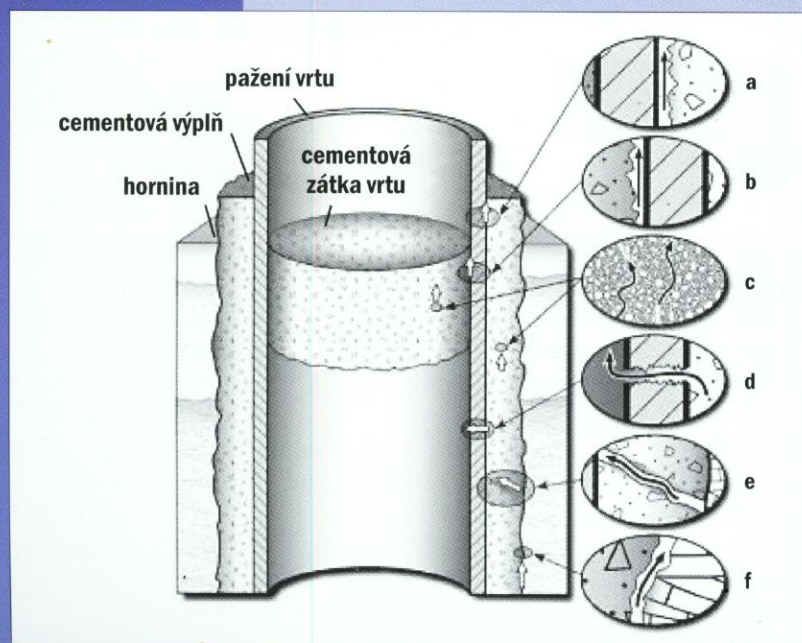
permeabilitou. Dobré vědecké a technické porozumění přírodním systémům s úniky i bez nich nám umožní navrhnout takové projekty ukládání CO₂, které budou vykazovat stejné charakteristiky jako přirozeně se vyskytující rezervoáry, jež zadržují CO₂ nebo metan už tisíce a miliony let.

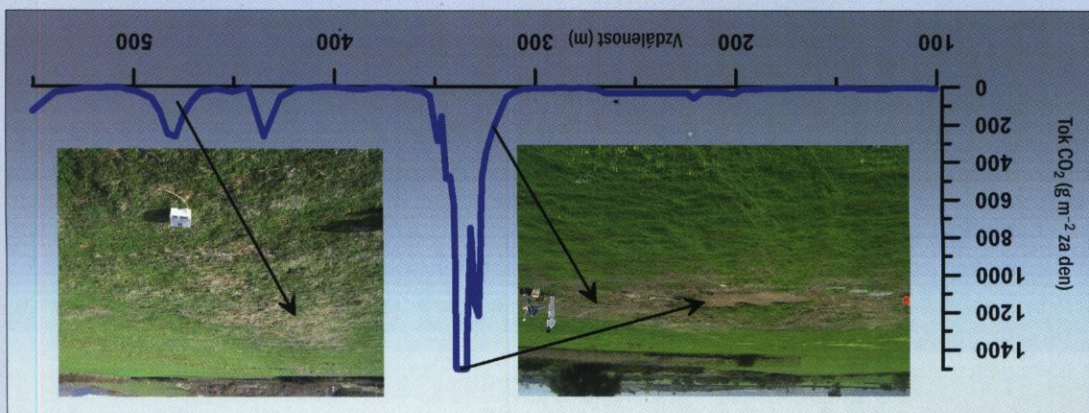
Přírodní analogy: co jsme se naučili

Přírodní systémy (tzv. „analogy“) jsou neocenitelným zdrojem informací pro zlepšení našeho poznání hluboké migrace plynů a přirozené výměny plynů mezi Zemí a atmosférou. Hlavní poznatky získané studiem mnoha rezervoárů přírodních plynů, jak s úniky, tak i bez nich, mohou být shrnuty takto:

- Za příznivých geologických podmínek může být přírodně vzniklý plyn zadržen po dobu stovek tisíc až milionů let.
- Přirozené rezervoáry a kapsy plynu se dokonce vyskytují i v těch nejméně příhodných geologických podmínkách (např. ve vulkanických oblastech).
- Migrace jakéhokoli významnějšího množství plynu vyžaduje advekci (tj. proudění způsobené tlakem), protože difuze je proces velmi pomalý.
- Aby došlo k advekci, fluida (kapaliny a plyny) v rezervoáru se musí nacházet v podmínkách blízkých litostatickému tlaku*, aby zlomy a pukliny zůstaly otevřené nebo aby se mechanicky vytvořily nové cesty.
- Místa, kde dochází k únikům přirozeně se vyskytujících plynů na povrchu, se téměř výhradně nacházejí ve významně zlomově postižených vulkanických a seismicky aktivních oblastech, kde výrony plynu leží na aktivních nebo nedávno aktivovaných zlomech.
- Významné úniky plynu se vyskytují pouze zřídka a jsou vesměs omezeny na výrazně zlomově porušené vulkanické a geotermální oblasti, kde je CO₂ nepřetržitě produkované přírodními procesy.
- Anomálie plynu na povrchu se obvykle nacházejí ve formě plošně omezených až bodových výskytů, které mají omezený prostorový dopad na okolní prostředí.

Obrázek 1
Možné migrační cesty CO₂ ve vrtu. Únik je možný skrz degenerovaný materiál (c, d, e) nebo podél styčných ploch (a, b, f).





Obrázek 2
 Dopady úniku CO₂
 na vegetaci při silném
 (vlevo) a mírném
 (vpravo) toku plynu.
 Dopady jsou omezeny
 na místa, kde CO₂
 uniká.

Z toho vyplývá, že k vytvoření úniku plynu je nutná kombinace mnoha specifických podmínek. Je tedy velmi pravděpodobné, že CO₂ z dobře vybraného a zodpovědně provozovaného úložiště nebude unikat. Přestože je pravděpodobnost úniku nízká, je třeba zcela porozumět souvisejícím procesům a případným dopadům, aby bylo možno vybrat, vyprojektovat a provozovat co možná nejbezpeč-

nější geologická úložiště CO₂.

Dopady na člověka

CO₂ dýcháme pořád. CO₂ je pro lidské zdraví nebezpečný jen ve velmi vysoké koncentraci, zhruba od 50 000 ppm (5%), kdy způsobuje bolest hlavy, závrat a nevolnost. Hodnoty nad touto úroveň mohou způsobit smrt, pokud je jim člověk vystaven příliš dlouho, zejména udušením, když koncentrace kyslíku ve vzduchu poklesne pod úroveň 16%, která je potřebná k udržení lidského života. Uniká-li však CO₂ v ploché otevřené krajině, rychle se rozptýlí ve vzduchu, a to i při slabém větru. Potenciální riziko pro obyvatele je tak omezeno na uzavřené prostředí nebo topografické deprese, kde koncentrace CO₂ může vzrůst, protože CO₂ je těžší než vzduch a má tendenci se akumulovat při povrchu. Znalost charakteristik odplynění území je zde důležitá při prevenci a řízení rizik. Ve skutečnosti žije mnoho lidí trvale v oblastech s každodenními přirozenými výrony plynu. Např. v Ciampinu v Itálii, poblíž Říma, jsou obytné domy postaveny jen 30 m od míst výronů plynu, kde koncentrace CO₂ v půdě dosahuje 90% a denně do atmosféry uniká 7 tun CO₂. Místní obyvatelé se vyhýbají jakémukoli riziku dodržováním jednoduchých preventivních opatření, jako například že nespí v přízemí a udržují domy dobře větrané.

Dopady na životní prostředí

Potenciální dopady na ekosystémy by se lišily v závislosti na tom, zda je úložiště situováno na pevnině nebo pod mořským dnem.

U mořských ekosystémů je hlavní účinek CO₂ ionokaini a spouští ve snížení pH. S tím souvisí zejména dopady na faunu, která žije na mořském dně a nemůže se přesunout. Případně následky jsou však prostorově omezené a ekosystémy brzy poté, co unik přestane, vykazují známky obnovy. U pevninských ekosystémů mohou být dopady shrnuty zhruba takto:

- **Vegetace** – Přestože koncentrace CO₂ v půdním vzduchu na úrovni 20–30% jsou vlastně příznivé z hlediska výživy rostlin a zvyšují rychlost růstu některých druhů, hodnoty nad tímto limitem mohou být pro některé (ale ne všechny) rostliny smrtící. Tento jev se výrazně koncentruje na bezprostřední okolí místa výronu plynu; vegetace však zůstává silná a zdravá už ve vzdálenosti několika metrů (obr. 2).

- **Kvalita podzemní vody** – Chemické složení podzemní vody může být pozmeněno přidáním CO₂, neboť voda se pak stává kyselější a zhoršuje kvalitu podzemní vody. Kyselost vody může vyústit v rozpouštění hornin, snížení strukturalní celistvosti a vytvoření závrťů. Tento typ jevu se však vyskytuje pouze ve velmi specifických geologických a hydrogeologických podmínkách (tektonicky aktivní akvifery s vysokou rychlostí pohybu fluid, mineralogické složení bohaté na karbonáty), jejichž výskyt je v umělých úložištích nepravděpodobný.
- **Integrita hornin** – Oxysezení podzemní vody a prodávána jako „minerální voda“.

Dopady jakéhokoli hypotetického úniku CO₂ budou závislé na místních podmínkách úložiště. Proto pouze důkladná znalost geologické a strukturní stavby nám v konečném důsledku umožní identifikovat všechny potenciální unikové cesty plynu, vybrat úložiště s nejnižším potenciálem uniků a předpovídat chování plynu. Na tomto základě lze pak posoudit a předem eliminovat možné závažné dopady na člověka a ekosystémy.

Jak můžeme monitorovat úložiště v hloubce a na povrchu?

Všechna úložiště bude nutno monitorovat z důvodů provozních, bezpečnostních, společenských, ekonomických i kvůli ochraně životního prostředí. Musí být vypracována strategie definující, co přesně se bude monitorovat a jak.

Proč potřebujeme monitoring?

Teprve monitorování provozu úložiště bude bezpečnou zárukou, že bylo dosaženo základního cíle geologického ukládání CO₂, tj. dlouhodobé izolace antropogenního CO₂ od atmosféry. Jsou četné důvody pro monitoring úložišť, mj. tyto:

- **Provozní:** řídit a optimalizovat proces injektáže.
- **Bezpečnostní a environmentální:** předcházet jakémukoli dopadu na obyvatelstvo, faunu a ekosystémy v místě úložiště, popř. tento dopad minimalizovat, a zaručit přispění ke zmírnění globální změny klimatu.
- **Společenské:** poskytnout veřejnosti informace potřebné k tomu, aby porozuměla principu úložiště a získala důvěru v jeho bezpečnost.
- **Finanční:** vytvořit důvěru trhu v technologii CCS a ověřit uložený objem CO₂, aby mohl být posouzen jako „nevypuštěné emise“ v příštích fázích Systému obchodování s emisemi Evropské unie (ETS).

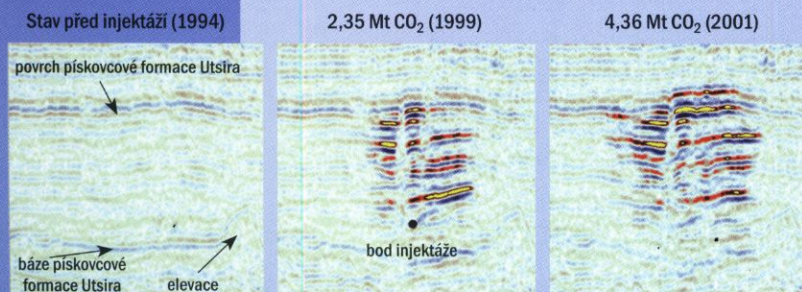
Monitorování původního stavu prostředí (tzv. „baseline“) i následného vývoje úložiště je důležitým regulatorním požadavkem Evropské směrnice o geologickém ukládání CO₂ z 23. dubna 2009. Operátoři musí prokázat, že provoz úložiště je v souladu s předpisy a že tento stav bude zachován i v dlouhodobém časovém horizontu. Monitoring je významným faktorem pro snížení nejistoty ohledně chování úložiště a jako takový by měl být pevně propojen s aktivitami řízení bezpečnosti.

Jaké jsou cíle monitoringu?

Monitoring může být zaměřen na různé cíle a procesy v různých částech úložiště, jako např.:

- Zobrazení oblaku CO₂ – sledování CO₂ migrujícího od bodu injektáže. Tento typ monitoringu poskytuje klíčová data pro kalibraci modelů, které předpovídají budoucí rozložení CO₂ v úložišti. Je k dispozici řada ověřených technologií, zejména opakovaná seizmická měření, které byly úspěšně použity u několika demonstračních a pilotních projektů (**obr. 1**).
- Neporušenost těsnicí horniny. Monitoring je potřebný k posouzení, zda je CO₂ izolován v úložné struktuře, a také aby bylo možné vydat včasné varování v případě neočekávané migrace CO₂ směrem vzhůru. Tento typ monitoringu může být zvláště důležitý ve fázi injektáže, kdy tlak v rezervoáru významně, i když dočasně, vzrůstá.
- Integrita vrtů. Jde o významnou záležitost, protože hluboké vrtvy mohou potenciálně sloužit jako přímá cesta pro migraci CO₂ k povrchu. Injektážní vrtvy i všechny pozorovací vrtvy a starší opuštěné vrtvy musí být během injektážní fáze i po ní pečlivě monitorovány, aby se předešlo náhlému úniku CO₂. Monitoring se také používá k prověření toho, zda byly všechny vrtvy účinně utěsněny poté, co už nejsou potřeba. Stávající geofyzikální a geochemické monitorovací systémy, které jsou běžně používány při těžbě ropy a zemního plynu, mohou být instalovány uvnitř vrtů nebo nad nimi za účelem poskytnutí včasného varování a zajištění bezpečnosti.
- Migrace do nadloží. U úložišť, kde se v nadloží úložiště vyskytují další, mělké vrstvy s obdobnými vlastnostmi, jako má těsnicí hornina, může být nadloží klíčovou složkou redukující riziko úniku CO₂ do moře nebo do atmosféry. Pokud monitorování v rezervoáru nebo v oblasti těsnicí horniny indikuje neočekávanou migraci skrz těsnicí horninu, stává se monitoring nadloží nutností. V nadloží může být použita řada technologií používaných při sledování oblaků znečištění nebo monitorování neporušenosti těsnicích hornin.
- Povrchové úniky a detekce a měření v atmosféře. Abychom se ujistili, že uložený CO₂ nemigroval k povrchu, máme k dispozici řadu geochemických a biochemických metod i metod dálkového průzkumu, které jsou schopny lokalizovat úniky, posoudit a monitorovat distribuci CO₂ v půdě a jeho rozptýl v atmosféře nebo v mořském prostředí (**obr. 2**).

Obrázek 1
Seizmické záznamy monitorující oblak CO₂* na úložišti Sleipner před injektáží (začala v r. 1996) a po injektáži (o 3 a 5 let později).



Jaká bezpečnostní kritéria je třeba zavést a dodržovat?

Aby byla zajištěna bezpečnost a účinnost ukládání, musí regulační orgány stanovit podmínky pro zpracování projektu a provoz úložiště, které musí provozovatel dodržovat.

Přestože je dnes geologické ukládání CO₂ všeobecně přijímáno jako jedna z důvěryhodných možností pro zmírnění změny klimatu, je stále ještě třeba stanovit bezpečnostní kritéria týkající se ochrany lidského zdraví a okolního prostředí, a to dříve než dojde k plošnému rozšíření této technologie v průmyslovém měřítku. Taková kritéria mohou být definována jako požadavky uvalené regulačními orgány na provozovatele. Bude tím zajištěno, že místní vlivy na zdraví, bezpečnost a životní prostředí (včetně zdrojů podzemní vody) budou zanedbatelné, a to v krátkodobém, střednědobém i dlouhodobém časovém horizontu.

Jedním z klíčových bodů geologického ukládání je to, že má být trvalé, tzn. že se neočekává, že by docházelo k nějakým únikům z úložiště. Přesto musí být v rámci scénáře „co kdyby?“ posouzena rizika a od provozovatelů se bude požadovat, aby dodržovali opatření, která zabrání jakémukoli úniku nebo anomálnímu chování úložiště. Podle IPCC je třeba, aby uložený CO₂ zůstal v podzemí přinejmenším 1000 let, což by umožnilo stabilizaci nebo pokles atmosférické koncentrace CO₂ prostřednictvím přirozené výměny s vodou moří a oceánů. Tím by se minimalizoval nárůst povrchové teploty v důsledku globálního oteplování. Místní vlivy je ovšem třeba posuzovat v časovém měřítku od dnů až po mnoho tisíc let.

V průběhu životního cyklu projektu ukládání CO₂ lze identifikovat několik hlavních kroků (**obr. 1**). Bezpečnost bude zajištěna pomocí:

- pečlivého výběru a posouzení úložiště;
- posouzení bezpečnosti;
- správného provozování;
- vhodného monitorovacího plánu;
- přiměřeného plánu nápravných opatření.

S tím spojené klíčové cíle jsou:

- zajistit, aby CO₂ zůstal v rezervoáru;
- udržovat integritu vrtů;
- zachovat fyzikální vlastnosti rezervoáru (včetně pórizity, permeability, injektivit) a nepropustné těsnicí horniny;
- vzít v úvahu složení toku CO₂ a věnovat pozornost jakýmkoli

nečistotám, které nebyly eliminovány v procesu zachytávání; toto je důležité z hlediska zabránění nežádoucím interakcím s vrtem, rezervoárem, těsnicí horninou a – v případě úniku – s podzemní vodou v nadloží.

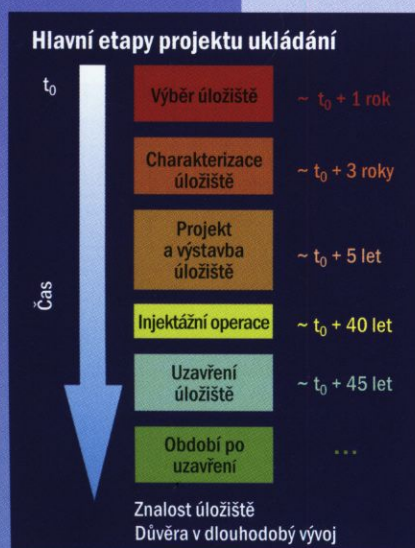
Bezpečnostní kritéria pro zpracování projektu

Bezpečnost musí být prokázána ještě před zahájením provozu. Hlavní složky prostředí, které musí být prověřeny s ohledem na výběr úložiště, zahrnují:

- rezervoár a těsnicí horninu;
- nadloží a zvláště nepropustné vrstvy, které by mohly fungovat jako sekundární těsnicí horizonty;
- přítomnost propustných zlomů nebo vrtů, které by mohly působit jako únikové cesty k povrchu;
- akvifery s pitnou podzemní vodou;
- zalidnění a omezení z hlediska životního prostředí na povrchu.

K posouzení geologie a geometrie úložiště se používají technologie známé z průzkumu ropy a plynu. Modelování pohybu fluid a geochemické i geomechanické modelování úložiště s CO₂ umožňují předvídat chování CO₂ a dlouhodobý výsledek celého procesu, a také definovat parametry pro účinnou injektáž. V konečném důsledku by pak pečlivá charakterizace úložiště měla umožnit definování scénáře jeho „normálního chování“, odpovídajícího úložišti vhodnému pro ukládání, kde jsme si jisti, že CO₂ zůstane zadržen v rezervoáru. Při posuzování rizik je ovšem třeba pracovat s méně přijatelnými scénáři budoucího stavu úložiště, včetně výskytu neočekávaných událostí. Zvláště je třeba počítat s potenciálními únikovými cestami, vystavením účinkům působení CO₂ a dalšími následky (**obr. 2**). Každý scénář úniku CO₂ z úložiště by měl být expertně posouzen a tam, kde je to možné, by se mělo použít numerické modelování za účelem posouzení pravděpodobnosti výskytu a potenciální závažnosti. Například by se měl pečlivě mapovat rozsah oblaku CO₂, aby se zjistilo jakékoli propojení s případnou zlomovou zónou. Při posuzování rizik je rovněž třeba pečlivě posoudit citlivost vůči změnám vstupních parametrů a nejistotám. Odhady případných vlivů na člověka a životní prostředí by se měla zabývat studie posouzení vlivů, která je běžnou součástí všech povolených procesů pro průmyslová zaří-

Obrázek 1
Jednotlivé etapy projektu ukládání.



Bezpečnostní kritéria během provozu a po jeho ukončení

Hlavní obavy o bezpečnost jsou spojeny s fází provozu ukončení injektáže dojde k poklesu tlaku, což zvýší bezpečnost uložení. Důvěra ve schopnost injektovat a uložit CO₂ bezpečným způsobem je spojena se zkušenostmi průmyslových firem. CO₂ je v zásadě bezpečným produktem používaným v řadě průmyslových odvětví, takže nakládání s touto substancí nevyvolává žádné nové problémy. Plán a řízení provozu jsou založeny hlavně na know-how z průmyslu ropy a plynů, zejména ze sezónního ukládání zemního plynu v zásobnících a z intenzifikace těžby ropy (EOR). Hlavní parametry pro řízení operací jsou:

- injektážní tlak a rychlost injektáže – tlak by měl

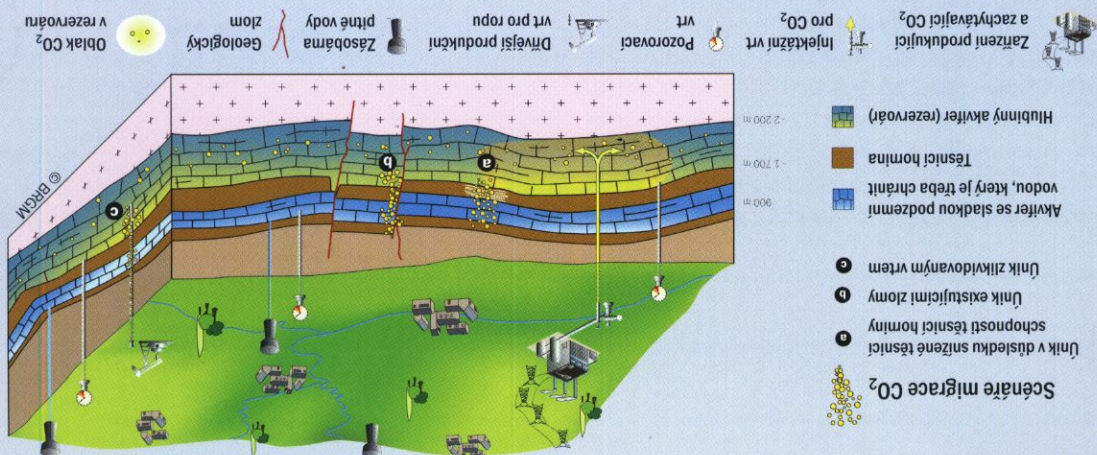
zůstat pod určitou hodnotou, aby se zabránilo unikům. V rámci tohoto procesu se zkoumají jak nor-
mální scénář, tak i scénáře s unikem CO₂, aby bylo možno posoudit všechna potenciální rizika spojená se zatížením.
Monitorovací program, krátkodobý i dlouhodobý, by měl být vytvořen podle výsledků analýzy rizik a měl by sledovat kritické parametry definované v rámci různých scénářů. Jeho hlavními cíli jsou sledování migrace oblaku CO₂, kontrola integrity vrtů a těsnosti horniny, detekce jakéhokoli uniků CO₂, posouzení kvality podzemní vody a zátoka, že žádný CO₂ nedosáhne povrchu. Poslední součástí posouzení bezpečnosti je plán nápravných opatření a opatření ke zmiřování následků. Je zaměřeno na podrobné rozpracování seznamu nápravných opatření, které je třeba přijmout v případě uniků nebo anomálního chování. Zahnuje možné narušení těsnosti horniny i havárii vrtů během období injektáže i po něm a bere v úvahu i extrémní nápravná řešení, jako zpětné čerpání uloženého CO₂. Existující know-how obsahuje stan-
dardní technologie používané při těžbě ropy a plynů, jako například zásah do již zkompletovaného vrtu, snižení injektážního tlaku, částečné nebo úplné odebrání plynu, extrakci vody za účelem snížení tlaku, odstranění mělce uloženého plynu atd.

Závěrem lze říci, že bezpečnostní kritéria jsou pro úspěšné průmyslové zavedení ukládání CO₂ zcela zásadní. Musí být přizpůsobena pro každé jednotlivé uložení. Tato kritéria budou zvláště vyznamána pro souhlas veřejnosti a zásadní pro povolenací proces, v jehož rámci musí regulační orgány definovat, do jakých podrobností mají být bezpečnostní požadavky řešeny.

plán může být zastaven nebo minimalizován. Schválená příslušná evropská směrnice vytváří první rámec zajišťující, že zachytávání a ukládání CO₂ je dostupnou alternativou zmírňující změny klimatu a že může být prováděno bezpečně a zodpovědně.

Během injektáže bude třeba opakovaně srovnávat chování injektovaného CO₂ s předpoklady. Pokud soustavě zlepší naše znalost uložení. Pokud se zjistí jakékoli anomální chování, měl by se nově upravit monitorovací program a v případě potřeby by se měla přijmout nápravná opatření. Pokud se objeví podezření na unik, vhodné monitorovací nástroje lze zaměřit na konkrétní část uložení, od vlastního rezerváru až po povrch. Tím by se zjiš-
til výstup CO₂ a kromě toho i jakékoli nepříznivé vlivy na akvifery s pitnou vodou, životní prostředí a v konečném důsledku tedy i na obyvatelstvo.

- injektovaný objem, kvůli srovnání s předpoklady přetvoření se v těsnici hornině vytvářejí trhliny;
- injektovány modelováním;
- složení toku injektovaného CO₂;
- integrity injektážních vrtů a všech dalších vrtů situovaných v oblasti rozšíření oblaku CO₂ nebo pobliž;
- rozsah oblaku CO₂ a zjištění jakéhokoli uniků; stabilita povrchu.



Obrázek 2
Příklady potenciálních scénářů uniků.

Akvifer: propustné horninové těleso obsahující vodu. Akvifery nejbližší k povrchu obsahují sladkou vodu využívanou pro spotřebu obyvatelstva. Hlubší akvifery jsou naplněny slanou vodou, která není vhodná pro žádné lidské potřeby. Nazývají se slané akvifery.

CCS (CO₂ Capture and Storage): zachytávání a ukládání CO₂.

CSLF: Carbon Sequestration Leadership Forum (Vůdčí fórum pro odbourávání uhlíku). Mezinárodní iniciativa v oblasti změny klimatu, která se zaměřuje na vývoj zlepšených, efektivních technologií pro separaci a zachytávání oxidu uhličitého a jeho transport a dlouhodobé bezpečné ukládání.

EU GeoCapacity: dokončený evropský výzkumný projekt, který posoudil celkovou kapacitu pro geologické ukládání antropogenních emisí CO₂ v Evropě.

GESTCO: dokončený evropský výzkumný projekt, který posoudil možnosti geologického ukládání CO₂ v 8 zemích (Norsko, Dánsko, Velká Británie, Belgie, Nizozemí, Německo, Francie a Řecko).

IEA-GHG: Mezinárodní energetická agentura – Program výzkumu a vývoje pro skleníkové plyny. Mezinárodní spolupráce, která má za cíl: zhodnotit technologie pro snižování emisí skleníkových plynů, šířit výsledky těchto studií, identifikovat cíle pro výzkum, vývoj a demonstrační aktivity a podporovat příslušné práce.

Injektivita: charakterizuje, jak snadno může být tekutina (jako např. CO₂) injektována do geologické formace. Je definována jako rychlost injektáže dělená rozdílem tlaků mezi bodem injektáže uvnitř vrtu na jeho počtvě a ve formaci.

Intenzifikace těžby ropy (EOR): Technologie, která zvyšuje těžbu ropy pomocí injektáže fluid (např. páry nebo CO₂), jež pomáhají mobilizovat ropu v ložisku.

IPCC: Mezivládní panel pro změnu klimatu. Tato organizace byla založena v roce 1988 Světovou

Další zdroje informací:

Zvláštní zpráva o CCS Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC):

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Internetové stránky Generálního ředitelství pro klimatickou akci Evropské komise o CCS, včetně informací o právním rámci a implementaci Směrnice o geologickém ukládání oxidu uhličitého

http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

Internetová stránka IEA GHG s informacemi o nástrojích pro monitoring:

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

meteorologickou organizací (WMO) a Programem OSN na ochranu životního prostředí (UNEP) k posouzení vědeckých, technických a socioekonomických informací významných pro porozumění změně klimatu, jejím potenciálním dopadům a možnostem jejího zmírnění a adaptace. IPCC a Alu Gorovi byla udělena Nobelova cena míru za rok 2007.

Litostatický tlak: síla vyvíjená na horninu pod zemským povrchem nadložními horninami. Litostatický tlak roste s hloubkou.

Mikroseizmicitá: mírné chvění nebo vibrace v zemské kůře, bez vztahu k zemětřesení, které mohou být způsobeny různými přirozenými i umělými původci.

Nadloží: geologické vrstvy ležící mezi těsnicí horninou rezervoáru a zemským povrchem (nebo mořským dnem).

Oblak CO₂: prostorové rozložení superkritického CO₂ v horninových jednotkách.

Permeabilita (propustnost): vlastnost nebo schopnost pórovité horniny přenášet fluida; je měřítkem toho, jak snadno budou fluida protékat při existenci tlakového rozdílu.

pH: měřítko kyselosti roztoku; pH 7 odpovídá neutrální hodnotě.

Pórozita (pórovitost): procentní část celkového objemu horniny, která není vyplněna minerály. Tyto mezery se nazývají póry a mohou být vyplněny různými fluidy; v hluboko uložených horninách je typickým fluidem slaná voda, ale může to být i ropa, plyn (např. metan) a také přírodní CO₂.

Přírodní analog: přirozeně se vyskytující rezervoár CO₂. Existují jak lokality, kde CO₂ uniká, tak i lokality bez úniků. Jejich studium může zlepšit naše znalosti o dlouhodobém osudu CO₂ v hlubokých geologických systémech.

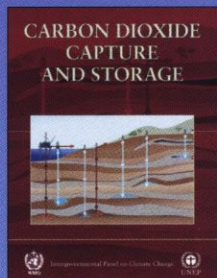
Rezervoár: těleso horniny, zpravidla sedimentární, které je dostatečně pórovité a propustné, aby mohlo přijmout a akumulovat CO₂. Nejobvyklejší rezervoárové horniny jsou pískovec a vápenec.

Solanka: velmi slaná voda obsahující vysoké koncentrace rozpuštěných solí.

Superkritický: stav fluida (tekutiny) při tlaku a teplotě, které převyšují tzv. kritické hodnoty (31,03 °C a 7,38 MPa pro CO₂). Vlastnosti takového fluida se spojitě mění; při nízkém tlaku se blíží plynu a při vysokém tlaku kapalině.

Těsnicí hornina: nepropustná vrstva horniny, která funguje jako bariéra pro pohyb kapalin a plynů a která vytváří geologickou past, pokud překrývá rezervoár.

Vrt: kruhový otvor vytvořený vrtáním, zvláště ve smyslu hlubokého otvoru o malém průměru, jako je například ropný vrt.





CO₂Geonet je evropská vědecká komunita, na níž se můžete obrátit s požadavkem na jasné a podrobné informace o geologickém ukládání CO₂, důležité inovativní technologii pro zmiřnění změny klimatu. CO₂Geonet byl iniciován Evropskou komisí jako síť excellence v 6. rámcovém programu (kontrakt EC FP6 v letech 2004–2009). Sdružuje 13 institucí ze 7 evropských zemí, vesměs s vysokým mezinárodním kreditem, které jsou hlavními aktéry v oblasti výzkumu geologického ukládání CO₂. V roce 2008 byl CO₂Geonet zaregistrován jako neziskové sdružení podle tran-couzského práva, aby mohl pokračovat ve svých aktivitách i po ukončení podpory ze strany EK. CO₂Geonet má rozsáhlé zkušenosti z výzkumných projektů zaměřených na: rezervuáry, těsnící horniny, potenciální migrační cesty CO₂ k zemskému povrchu, nástroje pro monitoring, potenciální dopady na člověka a ekosystémy, postoje veřejnosti a komunikaci s ní. CO₂Geonet nabízí širokou škálu služeb ve čtyřech hlavních oblastech: 1) společný výzkum; 2) odborná školení a trénink; 3) odborné poradenství; 4) informace a komunikace. CO₂Geonet postupně získával na síle a stal se stálo evropskou vědeckou referenční autoritou, schopnou poskytnout potřebnou vědeckou podporu širokému a bezpečnému uplatnění geologického ukládání CO₂. Rozšíření této komunity na celou Evropu právě probíhá prostřednictvím projektu CGS Europe, koordináční akce financované 7. rámcovým programem EU (2010–2013). V CGS Europe se spojilo pevně jádro tvořené asociací CO₂Geonet s dalšími 21 institucemi; do projektu je tak zapojeno 28 evropských zemí (24 členů EU a 4 přidružené země). Celkově je tak k dispozici několik set vědců a výzkumných pracovníků, schopných zabývat se všemi aspekty geologického ukládání CO₂ na základě mezdoborové integrace. Cílem je poskytovat zainteresovaným stranám a veřejnosti nezávislé a vědecky ověřené informace o geologickém ukládání CO₂.

Za účelem zvýšení povědomí veřejnosti o geologickém ukládání oxidu uhličitého odpovídá CO₂Geonet na otázku „Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?“ Tým předních vědců z CO₂Geonet připravil aktuální odpovědi i na šest souvisejících otázek, které vycházejí z výsledků a zkušeností celosvětového výzkumu. Cílem bylo poskytnout jasné a nezávislé informace určené širokému publiku a povzbudit dialog o základních otázkách týkajících se technologických aspektů geologického ukládání CO₂. Informace shrnuté v předkládané brožurě byly prezentovány na Tréninkovém a dialogovém workshopu, který se konal v Paříži 3. října 2007.

Brožuru „Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?“ lze v mnoha jazykových verzích stáhnout na www.co2geonet.com/brochure.

O této brožurě

CO₂Geonet užce spolupracuje s Programem pro skleníkové plyny Mezinárodní energetické agentury (IEAGHG).



Forum

CO₂Geonet byl uznán jako světově významný projekt ze strany CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum).



I mezinárodní scéně

CO₂Geonet získal široké uznání na evropské úrovni

CO₂Geonet (13 členů vyjmenovaných výše): **CGS** (Česká republika); **GBA** (Rakousko); **GEOCOMAR** (Rumunsko); **GEOINZ** (Slovensko); **G-IGME** (Estonsko); **GSI** (Irsko); **GTC** (Litva); **GTR** (Finsko); **LEGMC** (Lotyšsko); **ELGI** (Madararsko); **LNEG** (Portugalsko); **METU-PAL** (Turecko); **PGI-NRI** (Polsko); **RBINS-GSB** (Belgie); **SQU** (Švédsko); **SGUDS** (Slovensko); **S-IGME** (Španělsko); **SU** (Bulharsko); **TUWI** (Estonsko); **UB** (Srbsko); **UNIZG-RGNF** (Chorvatsko).



CGS Europe: Celoevropská koordináční akce

Logického ukládání CO₂ BGR (Německo); **BGS** (Velká Británie); **BRGM** (Francie); **GEUS** (Dánsko); **HWU** (Velká Británie); **IPFEN** (Francie); **IMPERIAL** (Velká Británie); **IRIS** (Norsko); **IRIS** (Norsko); **SPR** (Norsko); **TNO** (Nizozemí); **URS** (Itálie); **Sintef** (Norsko).



CO₂GeoNet

Evropská síť excelence v oboru geologického ukládání CO₂



www.co2geonet.eu

Sekretariát: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI.

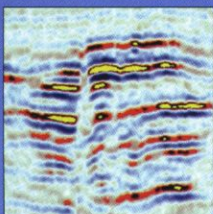
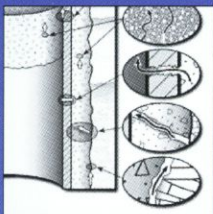
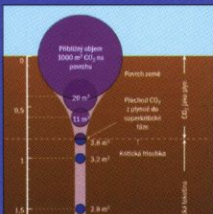
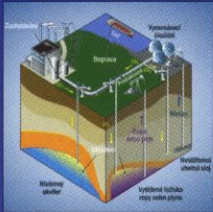
Českou verzi brožury vytvořila Česká geologická služba v rámci projektu CGS Europe – Celoevropská koordinační akce v oboru geologického ukládání CO₂ (projekt 7. rámcového programu EU).



ISBN: 978-80-7075-767-3



Obsah



Změna klimatu a potřeba geologického ukládání CO₂	4
1. Kolik CO₂ můžeme v podzemí uložit a kam?	6
2. Jak můžeme přepravovat a ukládat velká množství CO₂?	8
3. Co se stane s CO₂ po uložení do podzemního rezervoáru?	10
4. Mohl by CO₂ uniknout z úložiště, a pokud ano, jaké by byly důsledky?	12
5. Jak můžeme monitorovat úložiště v hloubce a na povrchu?	14
6. Jaká bezpečnostní kritéria je třeba zavést a dodržovat?	16
Glosář	18
Co je CO₂GeoNet?	19

Tato brožura byla vytvořena díky příspěvkům těchto autorů:

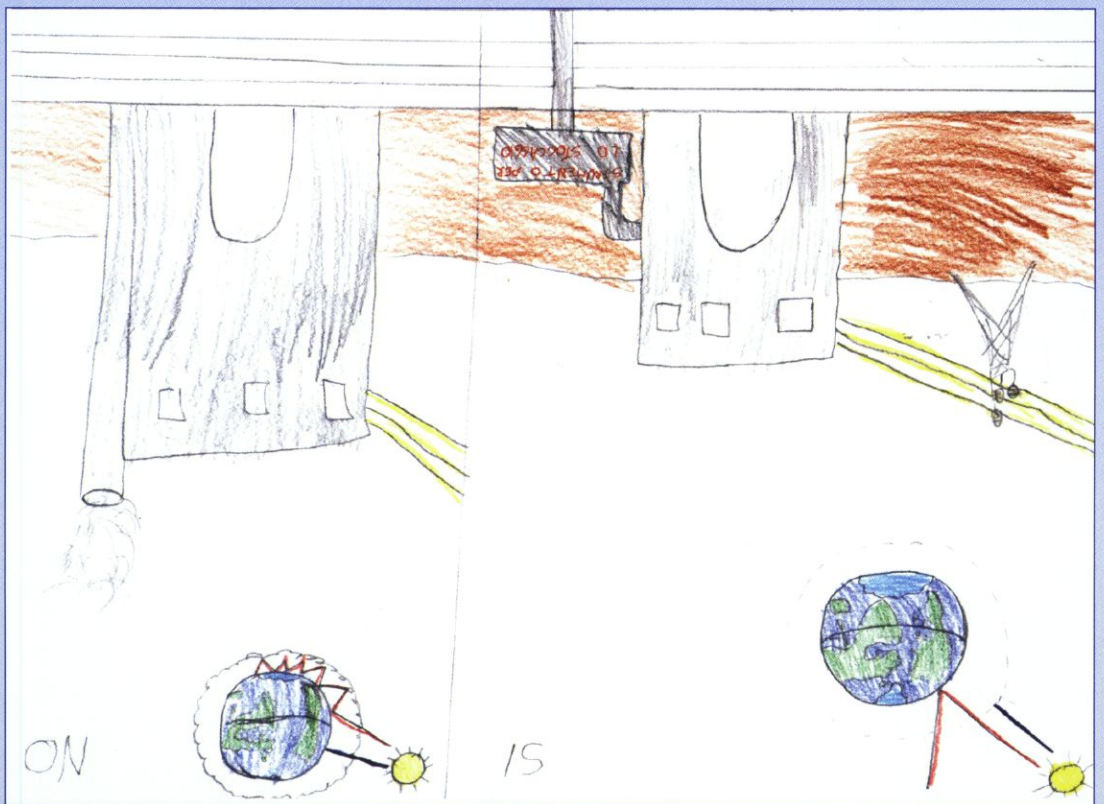
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavadias.

Český překlad: Vít Hladík, Vladimír Kolejka. Redaktor: Petr Maděra. Sazba: Oleg Man.

Vize budoucnosti



Už žádné kouřící komíny
Potrubí odvede CO₂ a uloží ho do podzemí
To je dobré pro naši Zemi



© Sapienza URS

Massimo, 10 let, Rim - Itálie

Pro naše děti
má geologické ukládání CO₂ smysl